

❑ 3D záznam tvarů objektů dopadem laserového paprsku na předmět a detekce odraženého záření – intenzita a směr, složení obrazu z velkého počtu diskretních bodů – není to holografie!

## Laserové skenování

### nevýhody:

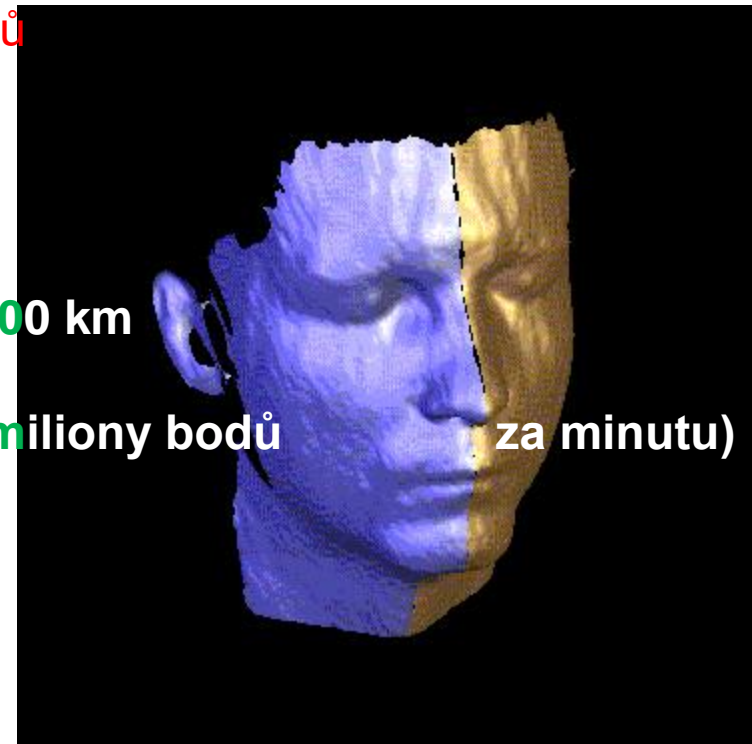
- ❑ špatná identifikace hran
- ❑ nutný speciální program na zpracování mračka bodů
- ❑ přístroje i software, které rychle stárnou

### výhody:

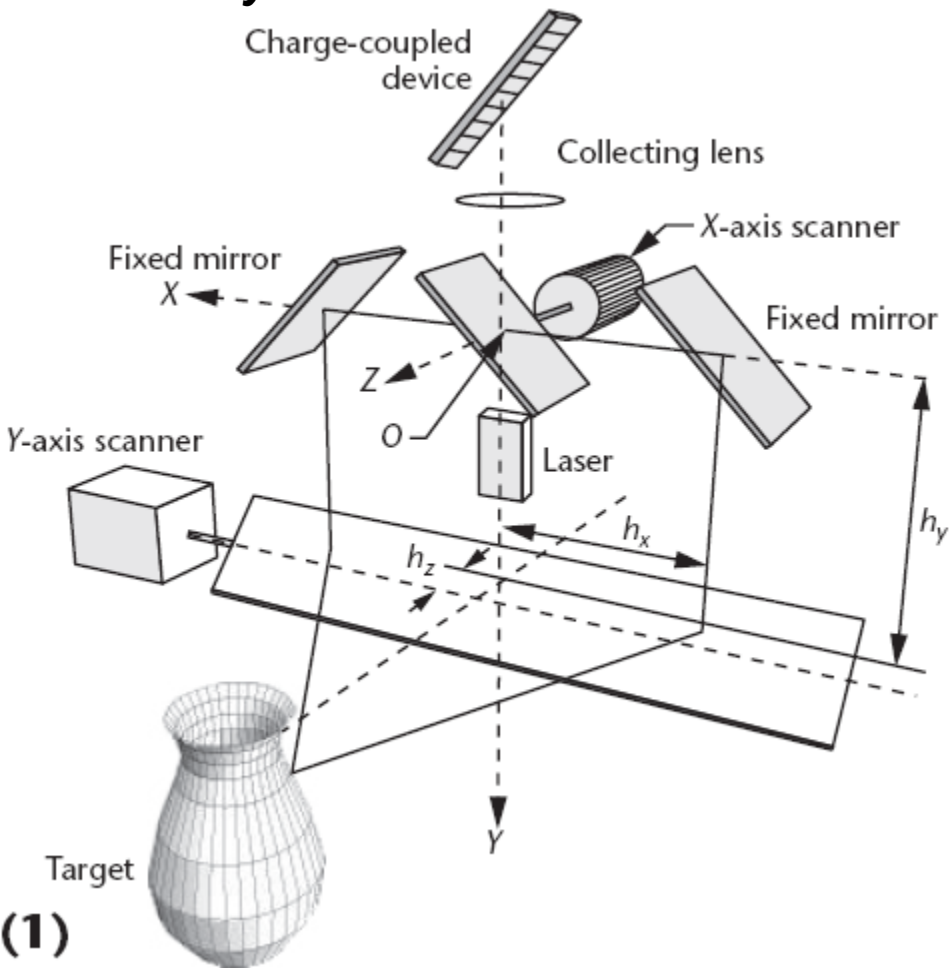
- ❑ bezdotyková profilometrie na vzdálenost cm – 100 km
- ❑ na vzduchu, ve vakuu i pod vodou
- ❑ rychlý sběr přímo měřených 3D bodů (tisíce až miliony bodů za minutu)
- ❑ zcela automatizovaný provoz

❑ Rozlišení desítky um na krátkou cm – m vzdálenost

- ❑ Laser např. polovodičový 905, 670, 658, 405 nm
- ❑ výkon jednotky až desítky mW



## Rozmítání paprsku ve 2 směrech x, y zrcadly

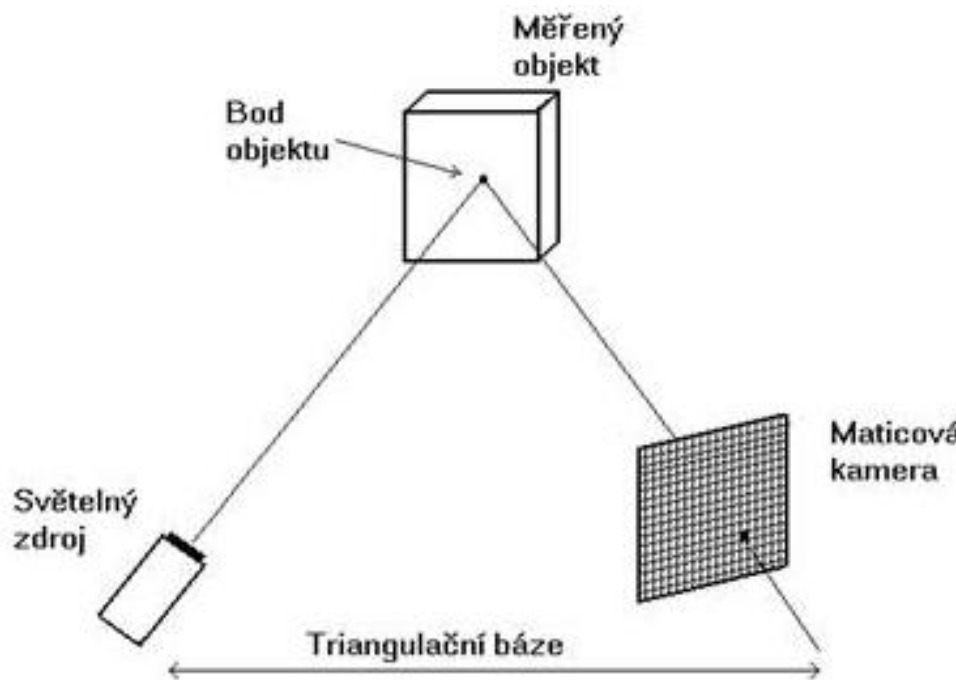


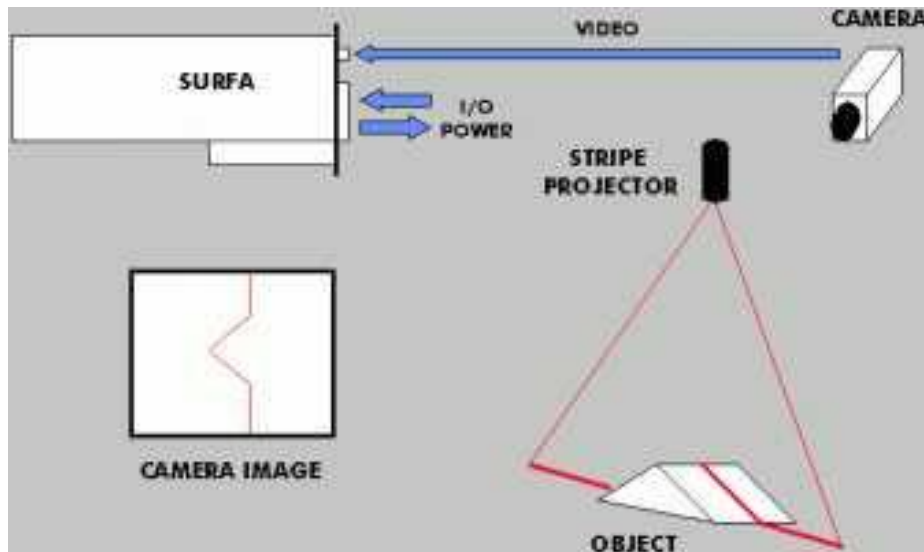
(1)

Triangulační metoda, rozlišení zblízka: 50  $\mu\text{m}$  xy, 10  $\mu\text{m}$  z; z dálky – LIDAR 1-20 bodů 25 cm na  $\text{m}^2$  z 1000 m.

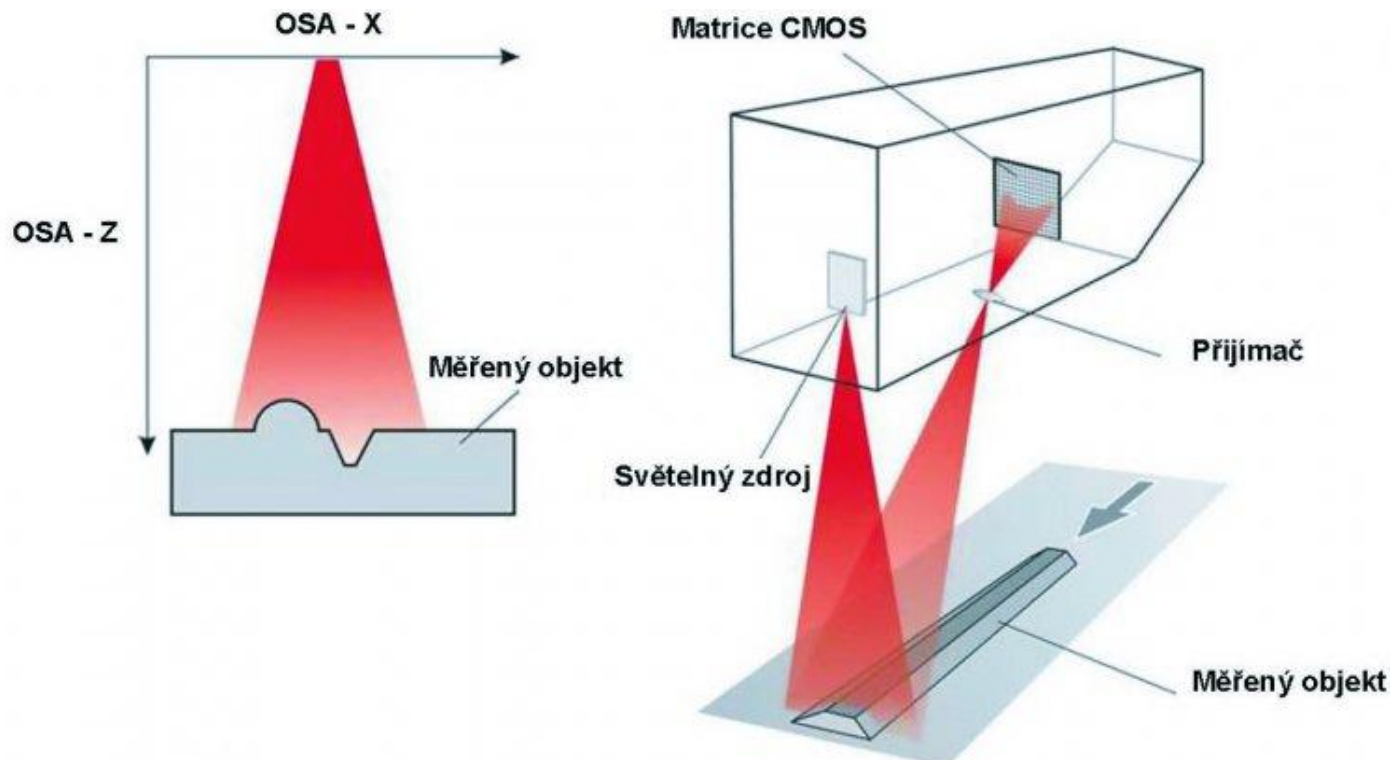
Ruční skenery i na stativu – rychlá orientace pomocí vybraných pevných vztažných bodů v okolí

Polovodičové lasery VIS a IR 800-1500 nm; někdy kombinováno i více viditelných barev, odraz – úhel a intenzita, skenování 10 – 100 kHz, modulace 300-800 kHz

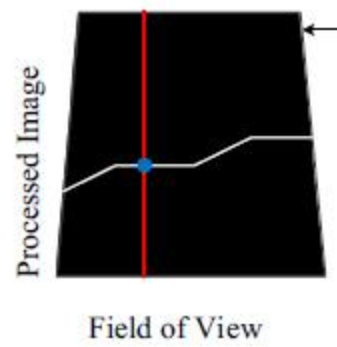
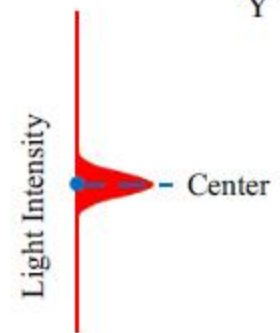
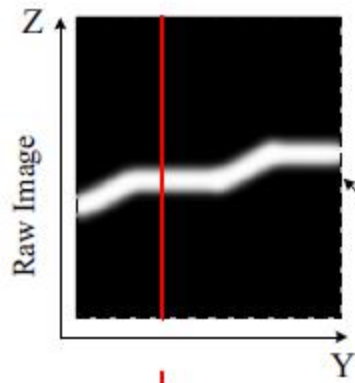
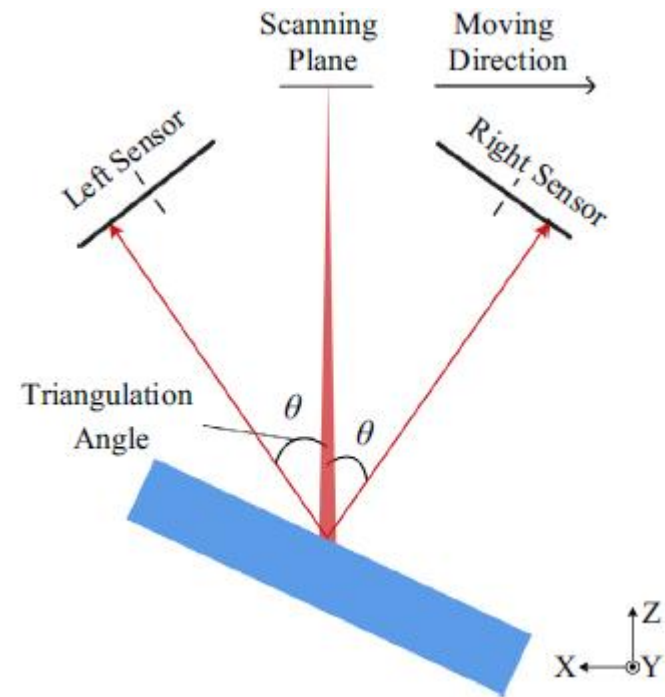
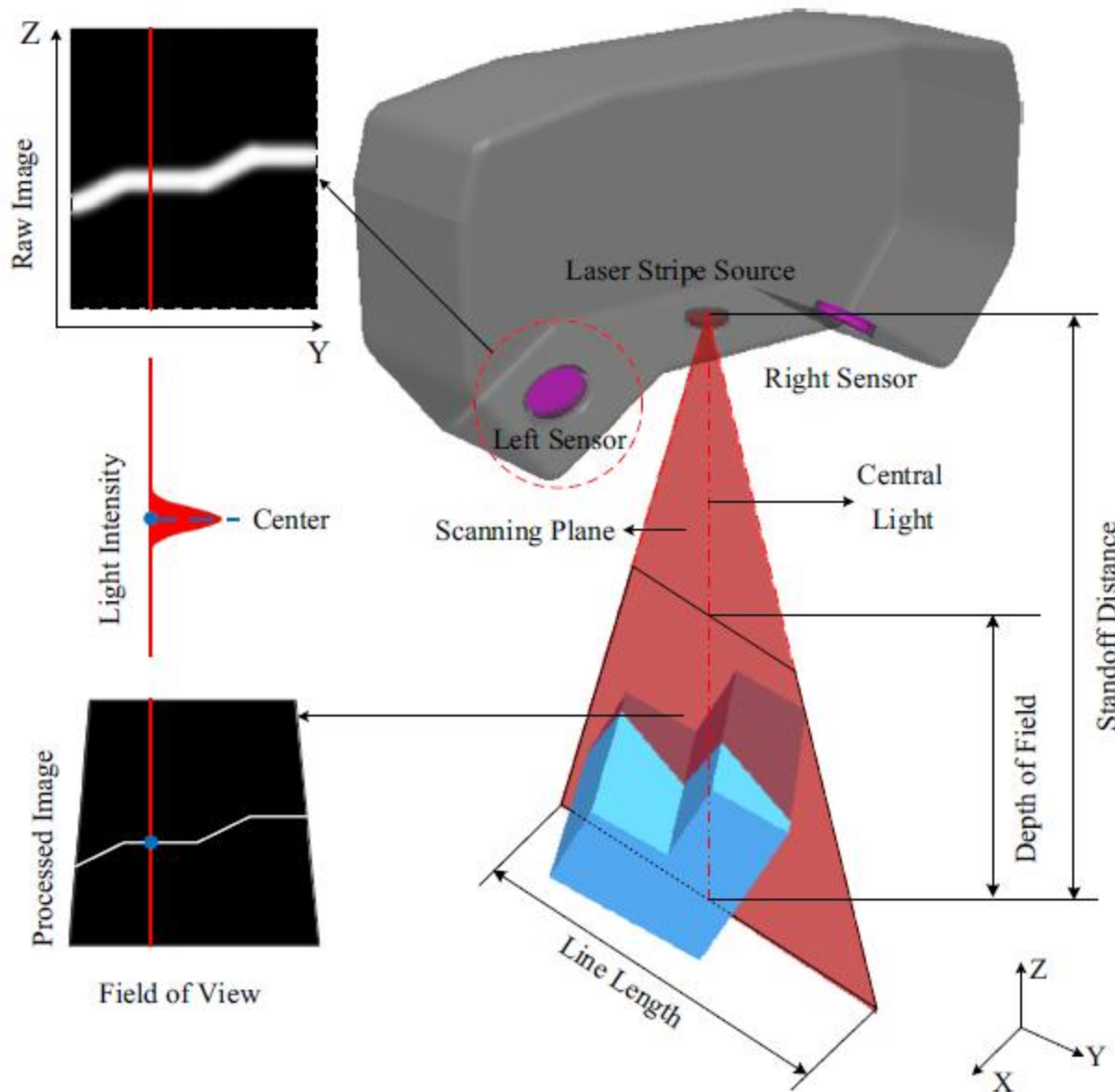




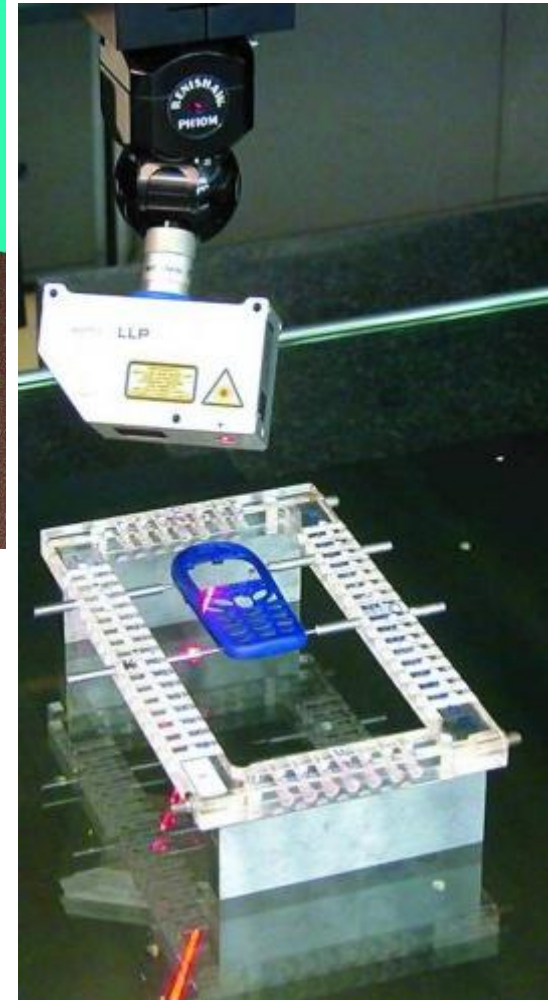
Liniové skenování s 1 přijímací kamerou



# Liniové skenování se 2 přijímacími kamerami



# Liniové skenování



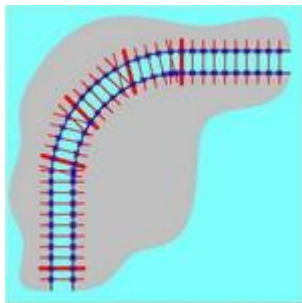
<https://youtu.be/EnYMMvv1Bw4>

<https://www.youtube.com/watch?v=1IDO1UevAJI>

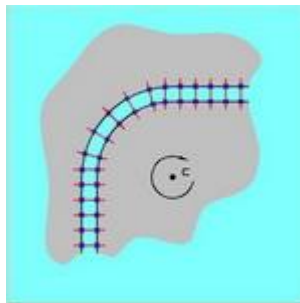
<https://youtu.be/Txf4P7hD9uY?list=PLIbNLALsbGQhVC9eXQ3pcf1z4FGD4Kz02> 5

# Problémy

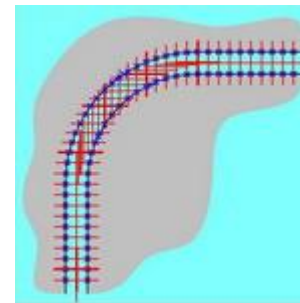
## *Skenování rýh a štěrbin*



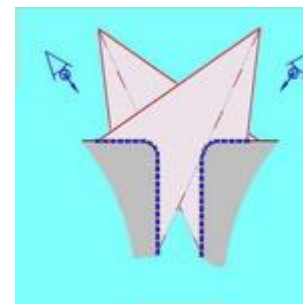
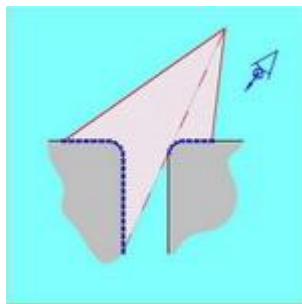
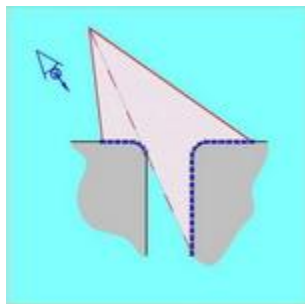
Rotace linie



Rotace linie sleduje tvar

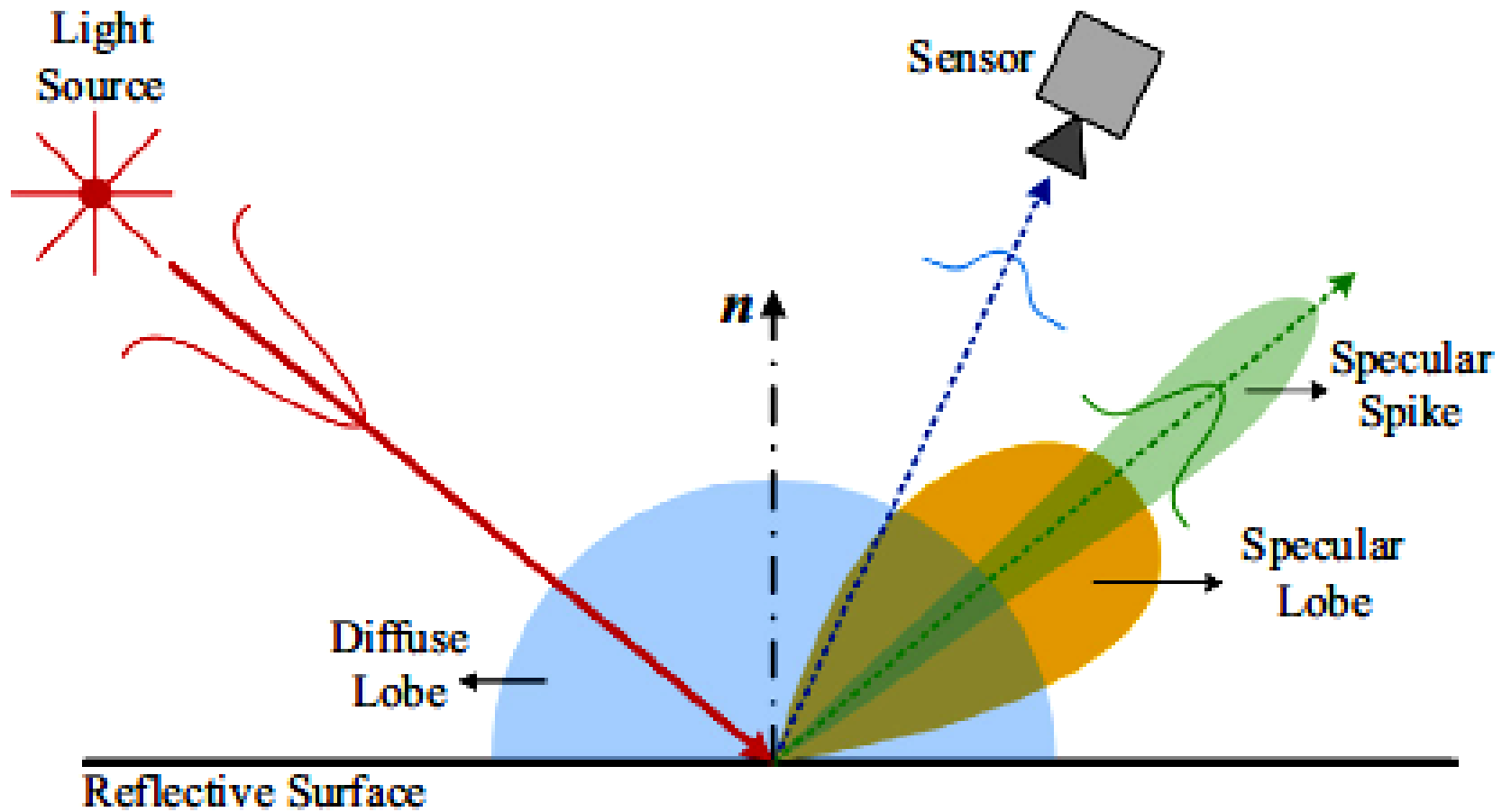


Sken zkříženými liniemi

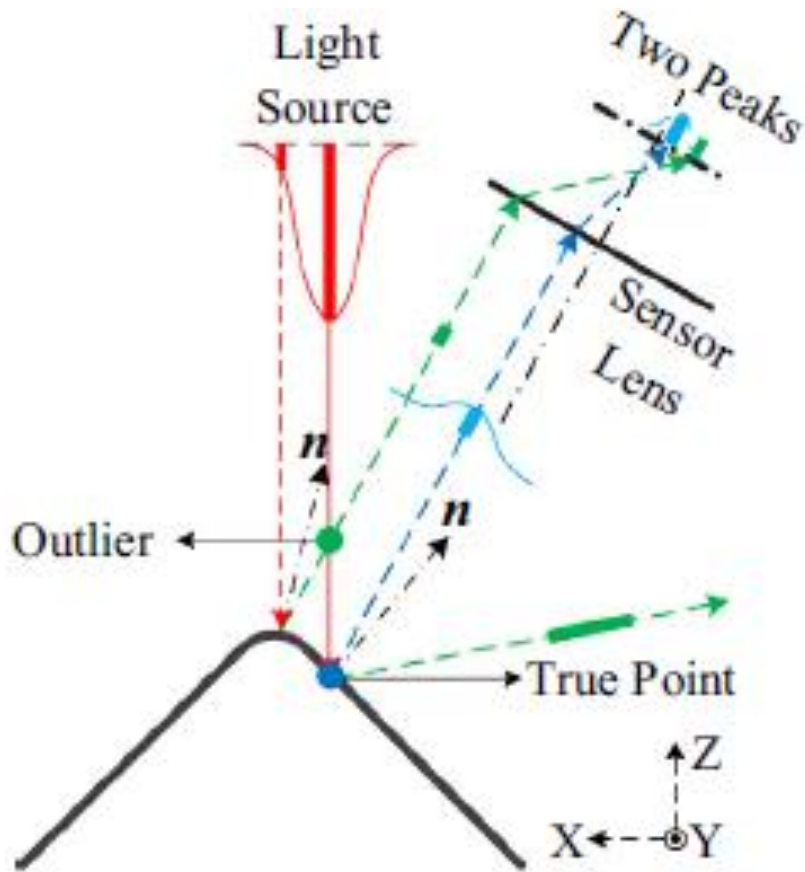


Místo jedné linie laserového paprsku i několik křížů – lepší zachycení štěrbin

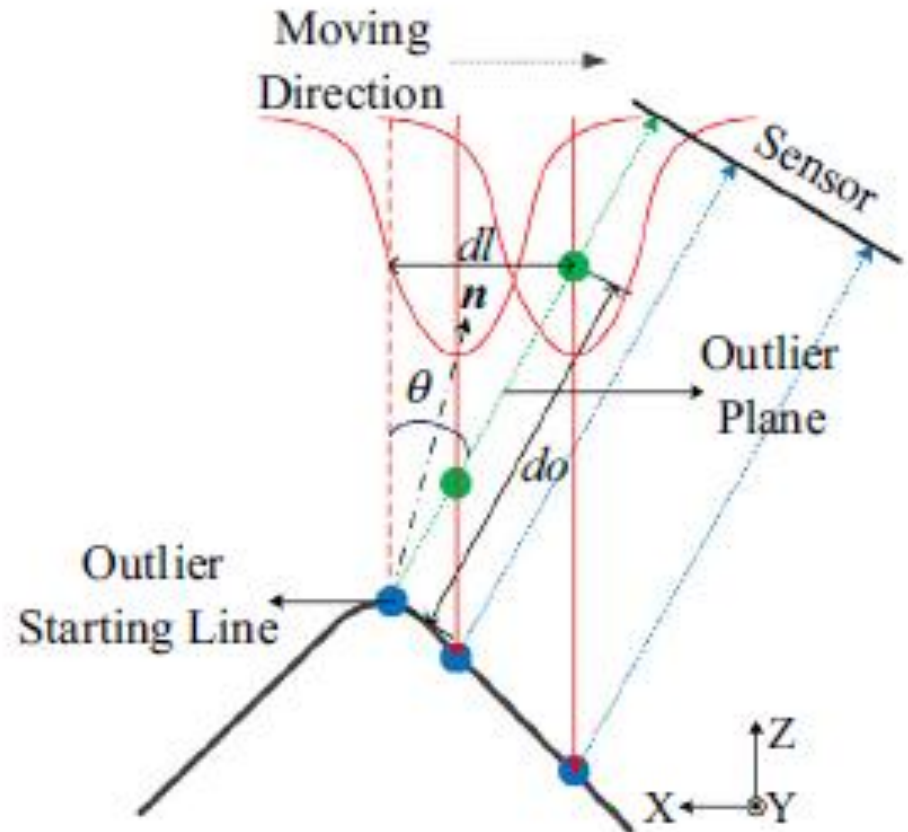
# Zrcadlové odrazy



# Skenování hran



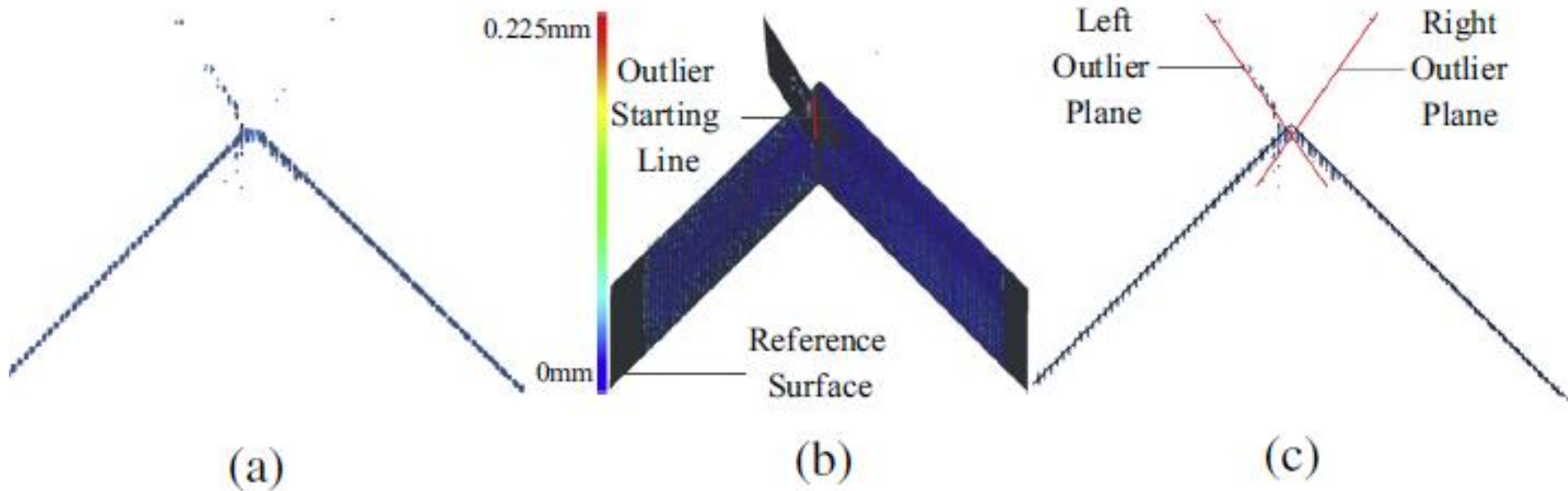
Smíšené odrazy



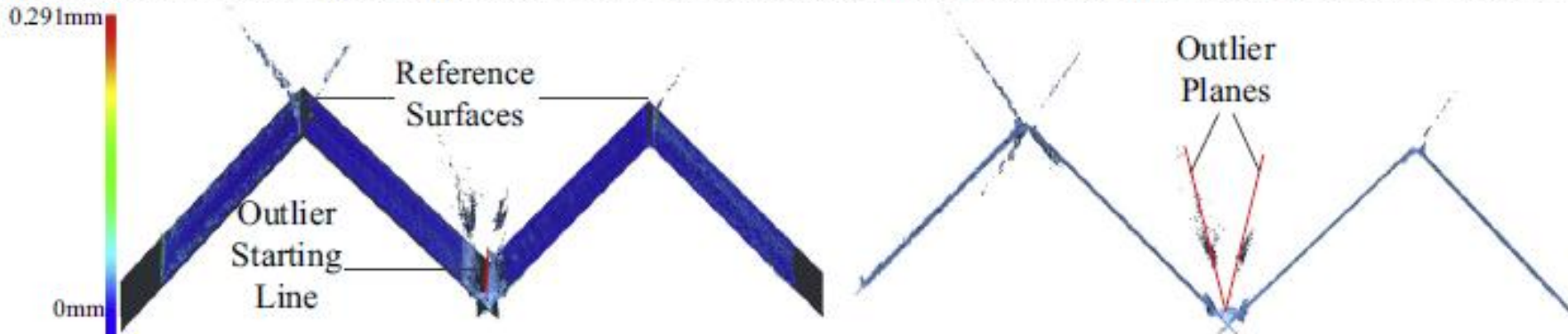
Odlehlé body



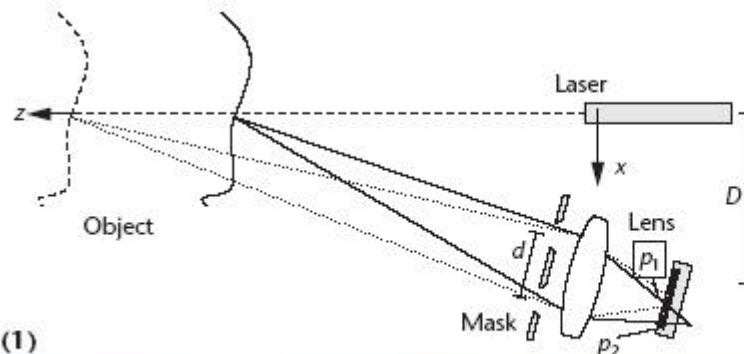
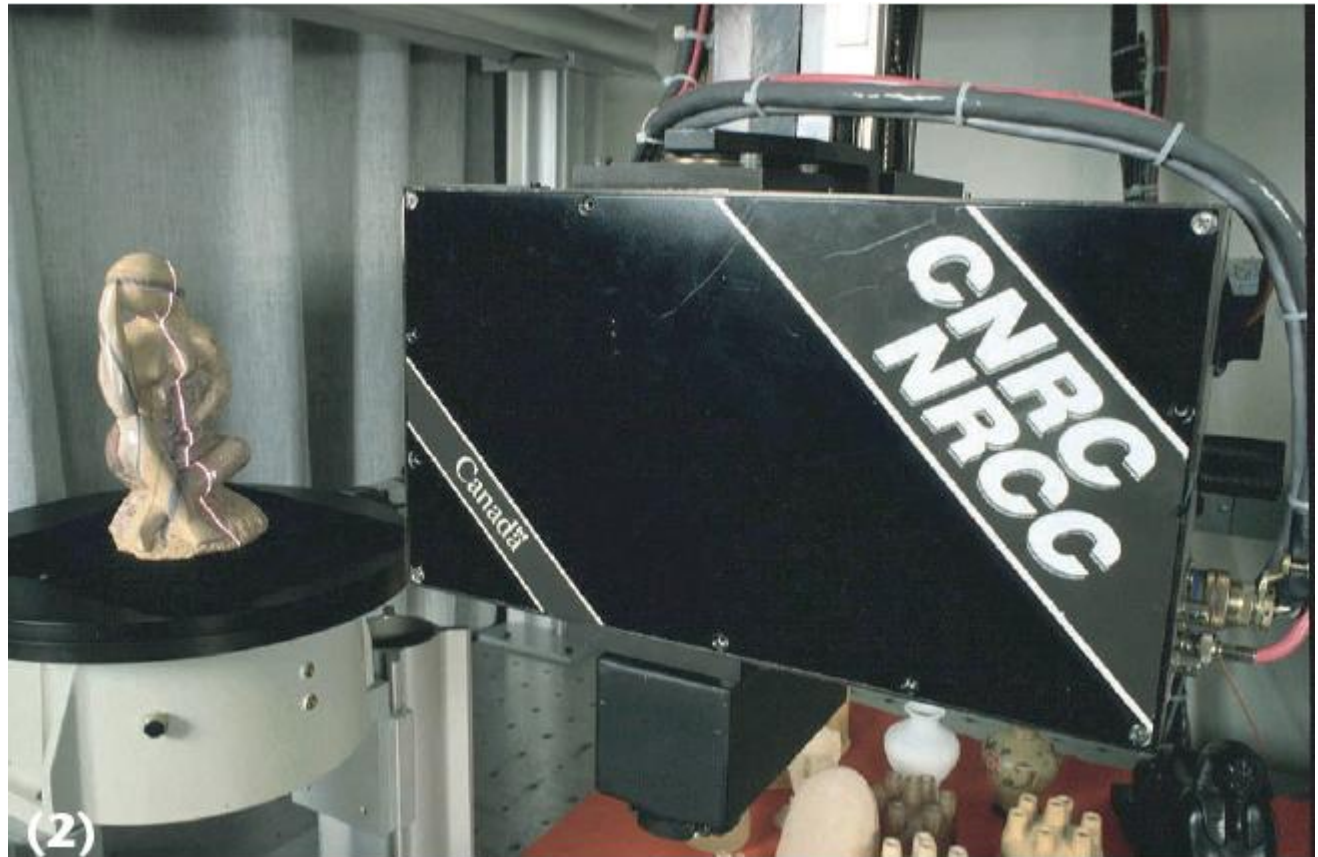
*Odlehlé parazitní body na hranách – zrcadlové odrazy*  
*Počet a poloha parazitních bodů výrazně závisí na orientaci předmětu*  
*– možnost jejich omezení*



Mixed reflection model validation: (a) scanned point cloud; (b) estimated outlier starting line; and (c) predicted outlier planes.



# Laboratorní skener



A Biris sensor. (1) The optical principle combines triangulation with a double aperture mask to improve the robustness of the laser line detection. (2) The head is compact and rugged. 10



## Příklad venkovního skeneru

vestavěný GPS přijímač

Chyba vzdálenosti  $\pm 2\text{mm}$

Rozsah 0.6 – 330 m

Redukce šumu 50 %

HD foto rozlišení 170 megapixel



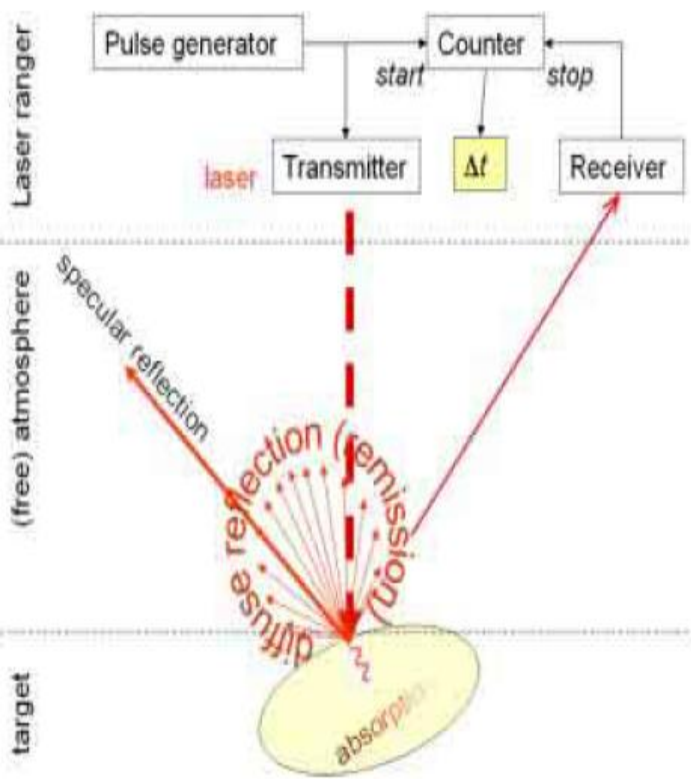
# Time of flight – měření doby od vyslání do návratu pulzu laseru

**Vzdálenost předmětového bodu  $R = c\Delta t/2$ ,  $c \dots$  rychlost světla ve vzduchu/vodě/vakuu**

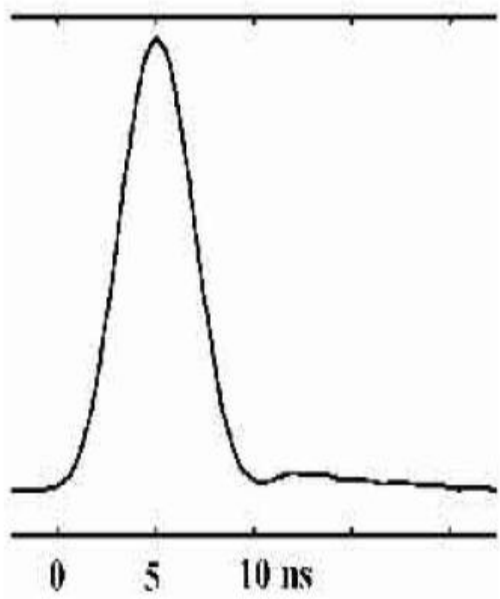
Typicky 5-300 m, nepřesnost 4-10 mm, pro velké vzdálenosti nad 1 km 1-několik cm.

Možnost záznamu barev RGB ve spojení se zabudovanou kamerou

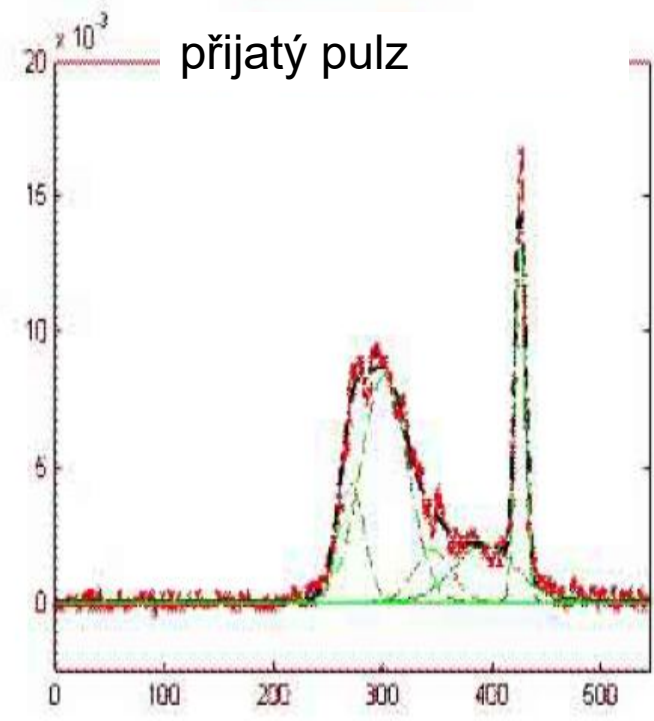
**Problém s** tvarem pulzu v čase i prostoru – ideálně gaussovský indexem lomu a rozptylem v atmosféře/prostředí parazitní několikanásobné odrazy



vyslaný pulz



přijatý pulz



## Fázový posuv

Amplitudová modulace nosné vlny dvěma dalšími vlnami a měření fázového posuvu

$\Delta\varphi$  vlny odražené od předmětu:  $r = \Delta\varphi / (2 \cdot \pi) \cdot \lambda / 2 + \lambda / 2 \cdot n$

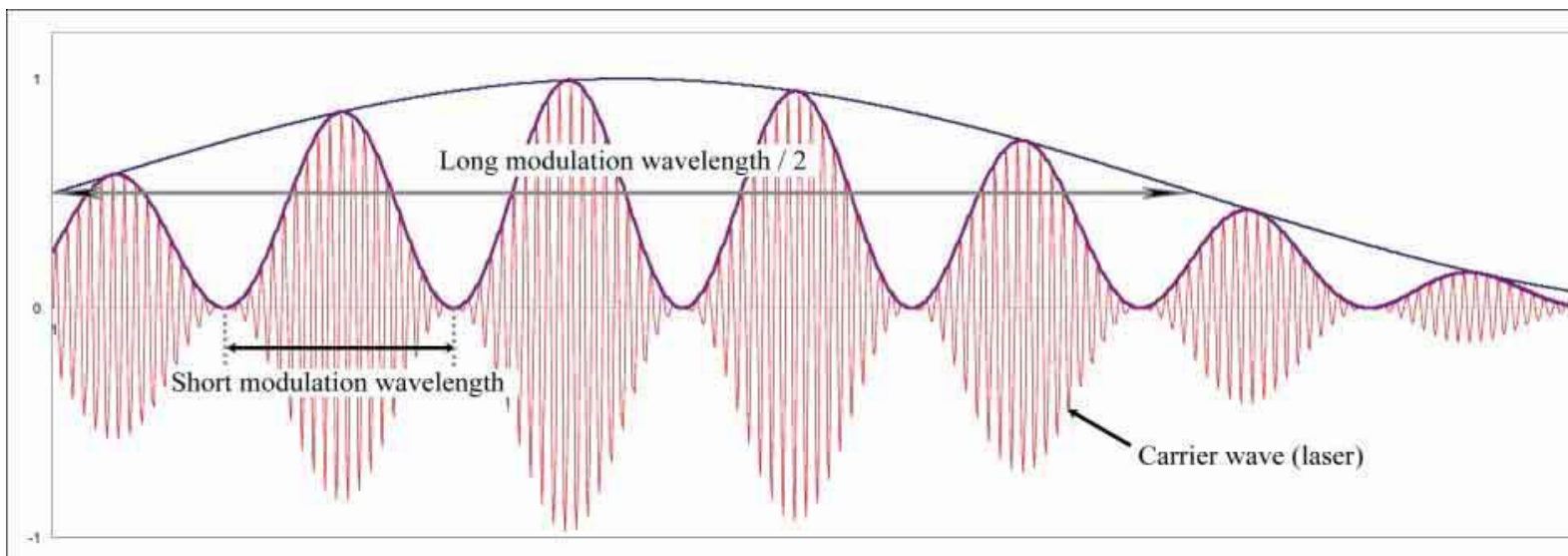
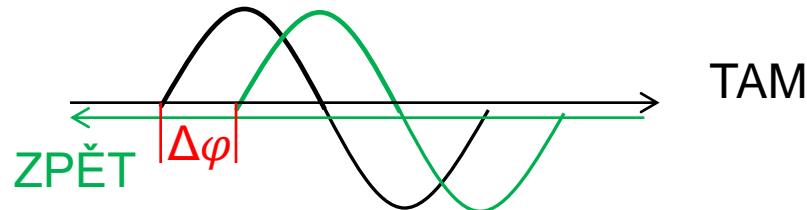
Rozsah 1-120 m, mm přesnost

Velmi rychlé - 100 000 bodů/s

automatické motorizované otáčení skeneru.

Interiéry a jinak omezené areály

Barevný záznam



## Triangulační metoda

Ze známé vzdálenosti mezi zdrojem paprsku a bodem přijímajícím odražený paprsek na CCD přijímače a úhlem mezi zdrojem a předmětem dopočet vzdálenosti bodu na předmětu

Rozsah 0,5-2 m, předmět 1 cm-3 m, mikrometrová přesnost

Většinou i možnost záznamu barev RGB, nutné profesionální osvětlení

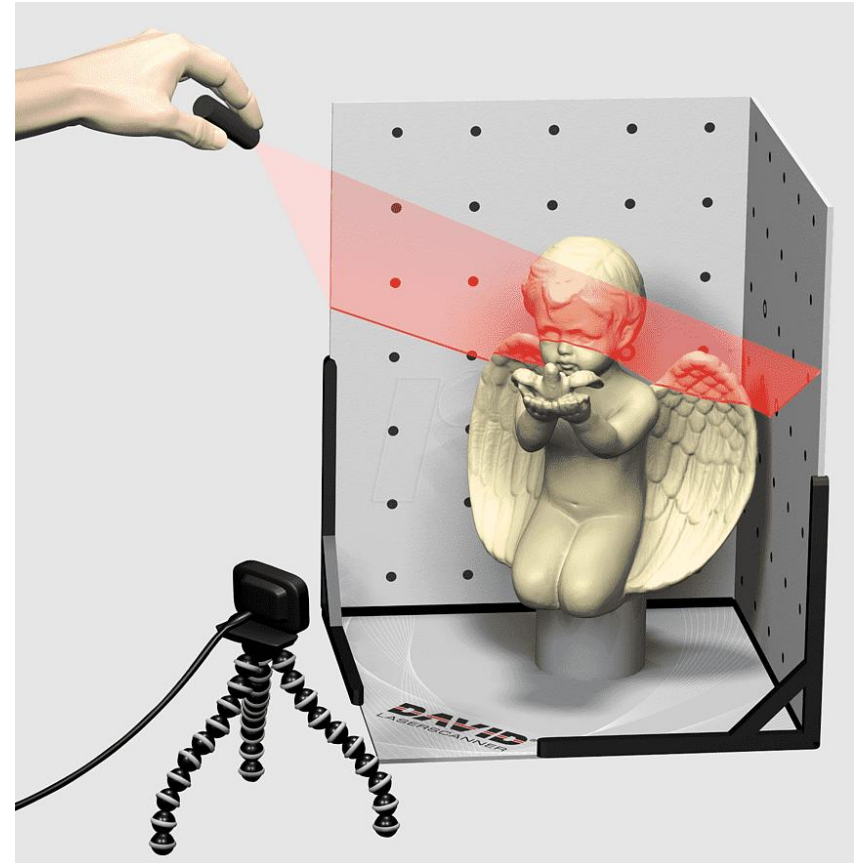
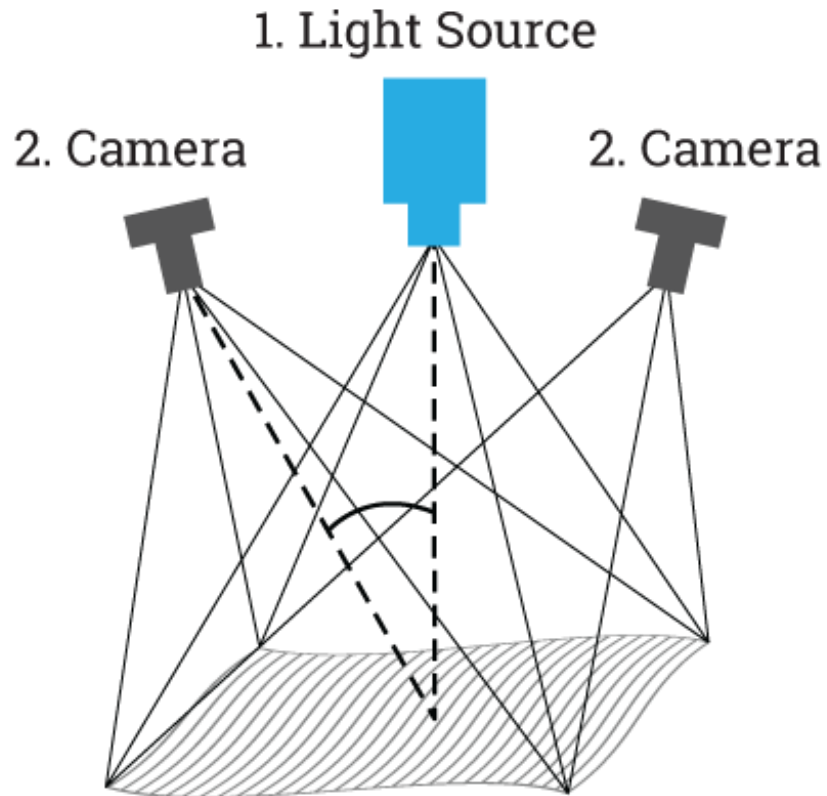
## Laser scanning techniques used in cultural heritage management activities

scanning system	use	typical accuracy / operating range	
	rotation stage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• scanning small objects (that can be removed from site)</li> <li>• to produce data suitable for a replica of the object to be made</li> </ul>	50 microns / 0.1m–1m
triangulation-based artefact scanners	arm mounted	<ul style="list-style-type: none"> <li>• scanning small objects and small surfaces</li> <li>• can be performed on site if required</li> <li>• can be used to produce a replica</li> </ul>	50 microns / 0.1m–1m
	mirror/prism	<ul style="list-style-type: none"> <li>• scanning small object surface areas <i>in situ</i></li> <li>• can be used to produce a replica</li> </ul>	sub-mm / 0.1m–25m
terrestrial time-of-flight laser scanners	<ul style="list-style-type: none"> <li>• to survey building façades and interiors, resulting in line drawings (with supporting data) and surface models</li> </ul>	3–6mm at ranges up to several hundred metres	
terrestrial phase-comparison laser scanners	<ul style="list-style-type: none"> <li>• to survey building façades and interiors resulting in line drawings (with supporting data) and surface models – particularly where rapid data acquisition and high point density are required</li> </ul>	c 5mm at ranges up to 50–100m	
airborne laser scanning	<ul style="list-style-type: none"> <li>• to map and prospect landscapes (including in forested areas)</li> </ul>	0.05m+ (depending on the parameters of the survey) / 100m–3500m	
mobile mapping	<ul style="list-style-type: none"> <li>• to survey highways and railways</li> <li>• for city models</li> <li>• to monitor coastal erosion</li> </ul>	10–50mm / 100–200m	

(adapted from Barber, DM, Dallas, RWA and Mills, JP 2006 'Laser scanning for architectural conservation', *J Archit Conserv* 12, 35–52)

# 3D skenování - strukturované světlo

Laser není potřeba!

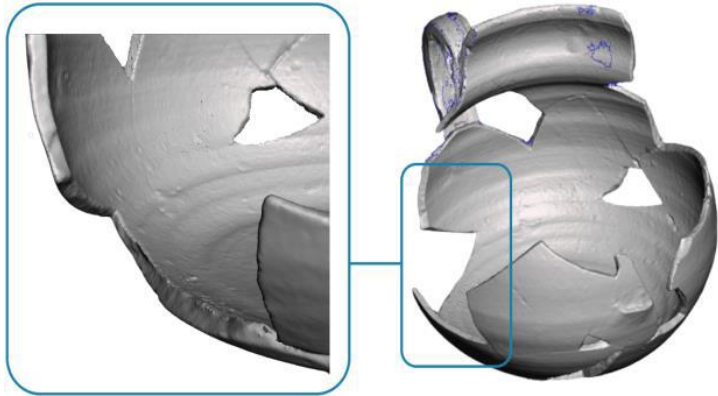


- 1) Promítnutí vzoru z dataprojektoru (čáry, mřížka...) na předmět
- 2) Snímání vzoru zdeformovaného členitostí povrchu z různých úhlů => záznam bodů se 3 souřadnicemi – 3D

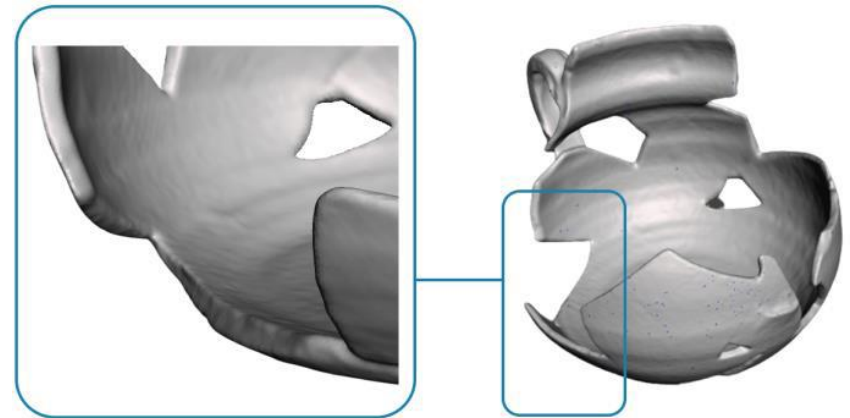


Archaeological Museum of Thessaloniki (AMTh)  
two-handled cup - late 1st - early 2nd century AD,

structured light technology and



laser scanning technology



Overall, the laser scanner can produce a final STL model of higher accuracy but with a significant drawback in the scanning time and data size of the final model. In the end, with the use of a structured light scanner, one can achieve similar accuracy with less than half of the scanning time, while choosing a meshing algorithm that can significantly reduce the model size.



### 1) skenování



思看PRINCE775激光扫描仪  
高精度3D扫描  
ScanTech high-precision 3D scanner PR

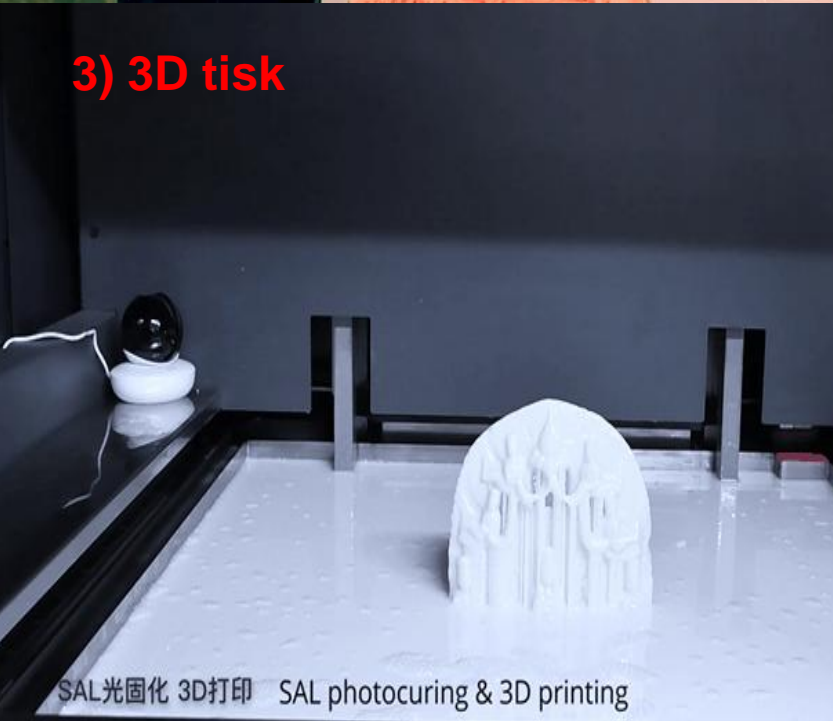
### 2) 3D model v PC

### Skenování v laboratoři

佛像3D模型  
3D model of buddha



### 3) 3D tisk



SAL光固化 3D打印 SAL photocuring & 3D printing

### 4) broušení, barvení

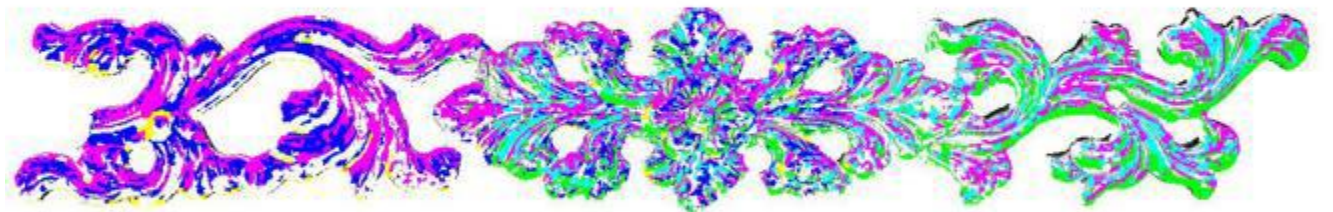


### leštění, barvení

## Opravy doplněním hmoty 3D tiskem

- 3D sken zachovalých částí předmětu
- v případě pravidelných vzorů tvorba 3D modelu včetně chybějících částí v PC
- 3D tisk chybějících částí

Ozdoba z Fuwang ge (Věž nepolapitelného snu) Belvedere of Viewing Achievements, 4. nádvoří palácového komplexu Peking  
-dřevo s pozlacenou mědí



3D sken → zpracování dat → 3D tisk



*P. Marie s dítětem:  
Szeged*

A. Fehér, Using 3D Scanners in Archaeology, Hungarian Archaeology E-journal, 2013 Summer

[http://www.linsinger.at/videos\\_2020/](http://www.linsinger.at/videos_2020/)

[https://www.3deling.com/heritage/?gclid=EAlaIQobChMIyoqgsOi99gIVYpBoCR2jxgiOEAMYAiAAEgJoffD\\_BwE](https://www.3deling.com/heritage/?gclid=EAlaIQobChMIyoqgsOi99gIVYpBoCR2jxgiOEAMYAiAAEgJoffD_BwE)

## Skenování staveb



Fig. 1: The Forum of Pompeii: view of the north side with the Temple of Jupiter.

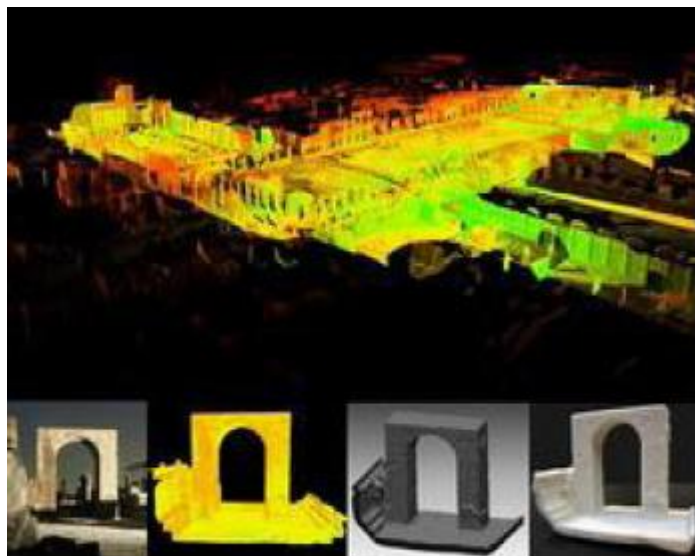


Fig. 11: The whole 3D model, after the processing of 468 scans with a miscalculation gap of 5-6 mm.



Fig. 2: The scanner 3D has been placed at a high position to avoid the shade areas due to the presence of people. It surveys a 360° angle area.



Fig. 3: The Forum of Pompeii during the 3D

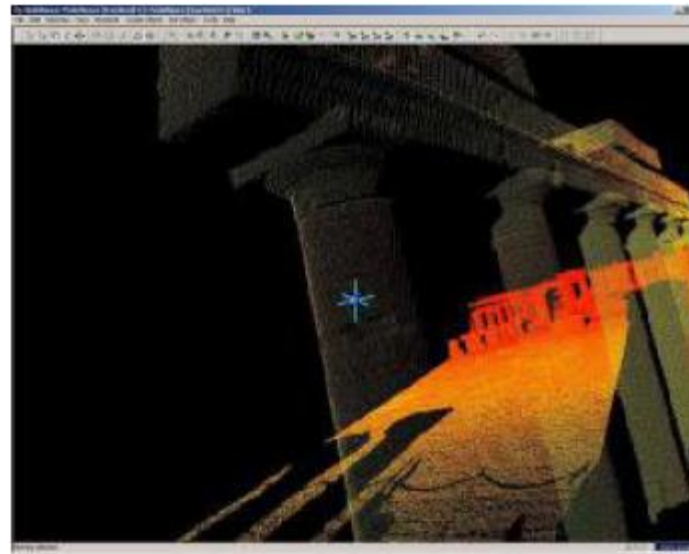


Fig. 4: "Cyclone"© software acquiring automatically a tie point (target).

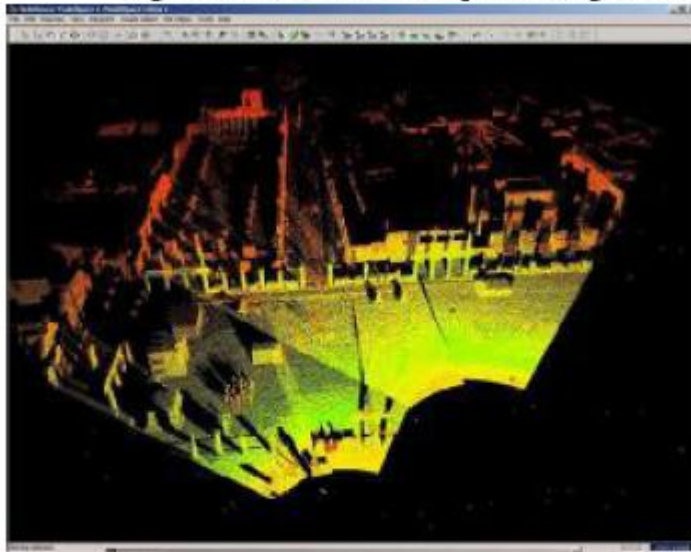
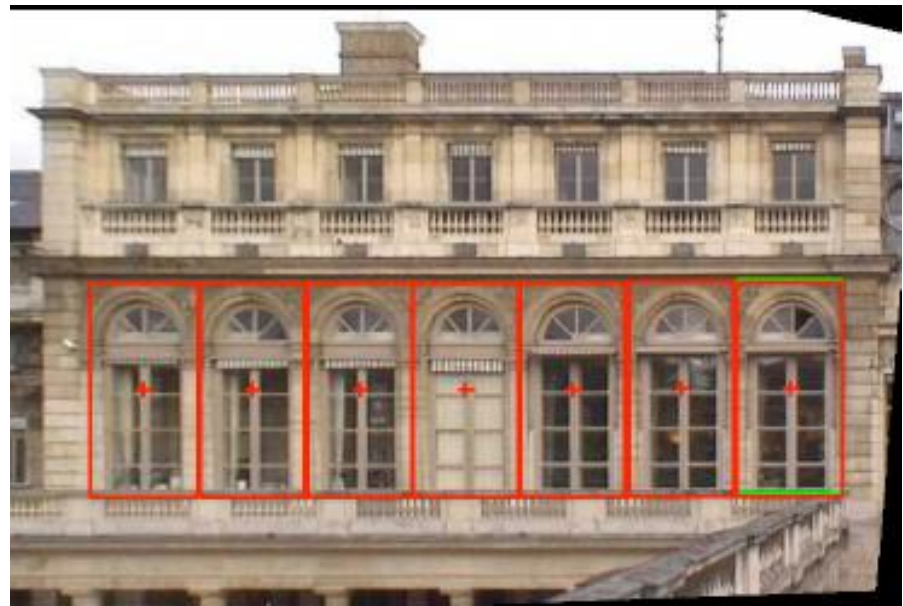
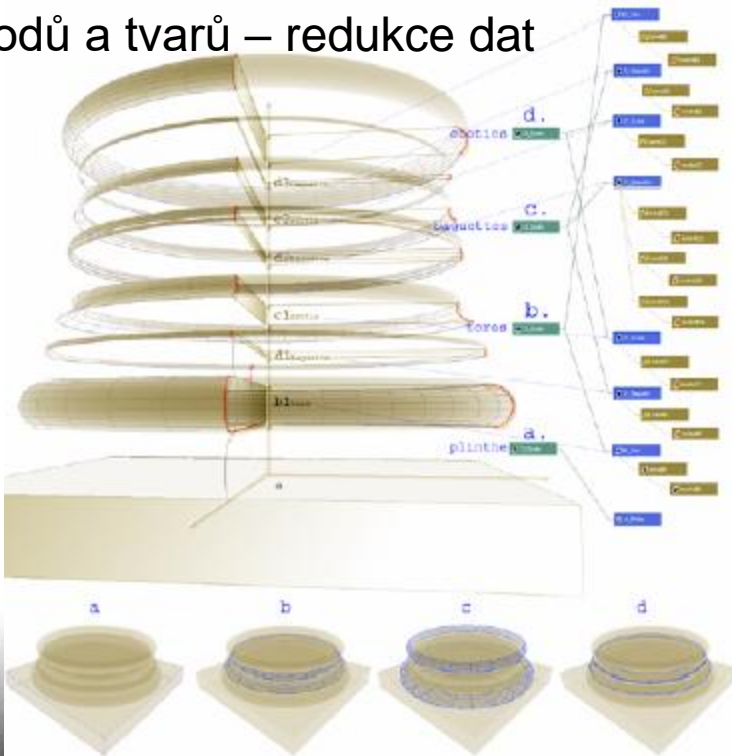


Fig. 8: Image in untrue colours of part of the 3D model, obtained by the superimposition of three scans.



# Výběr bodů a tvarů – redukce dat



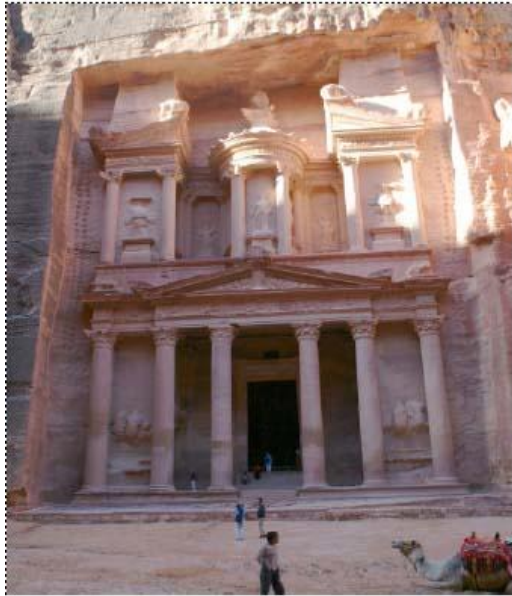


Figure 1. Al-Khasneh facade, Petra



Figure 2. Detailed view of the collected point cloud

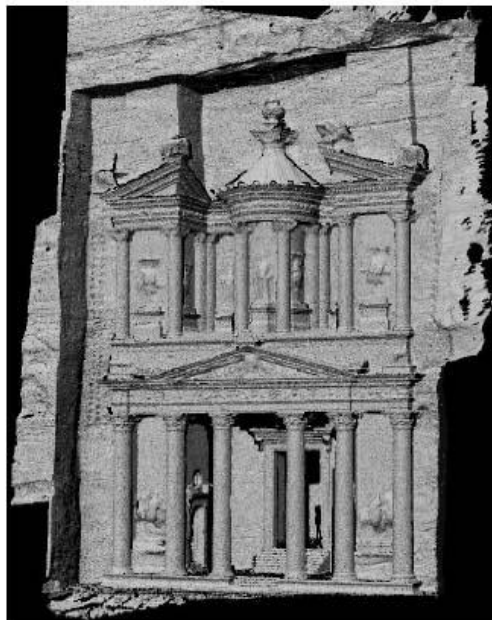


Figure 3. 3D Model of Al-Khasneh.

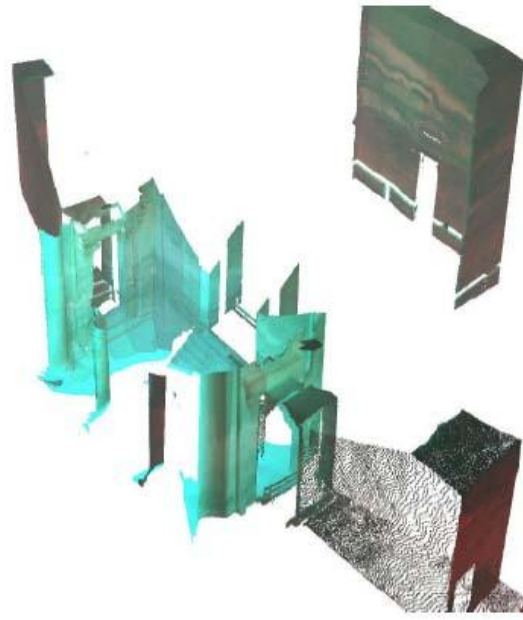


Figure 4. 360 degree scanning for the inner part of Al-Khasneh

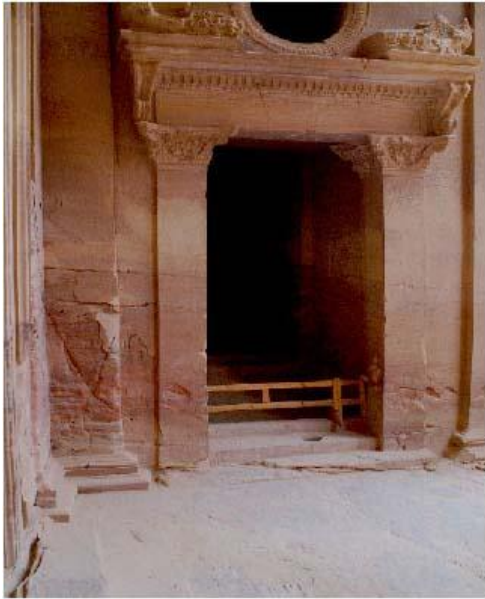


Figure 5. The left door of Al-Khasneh

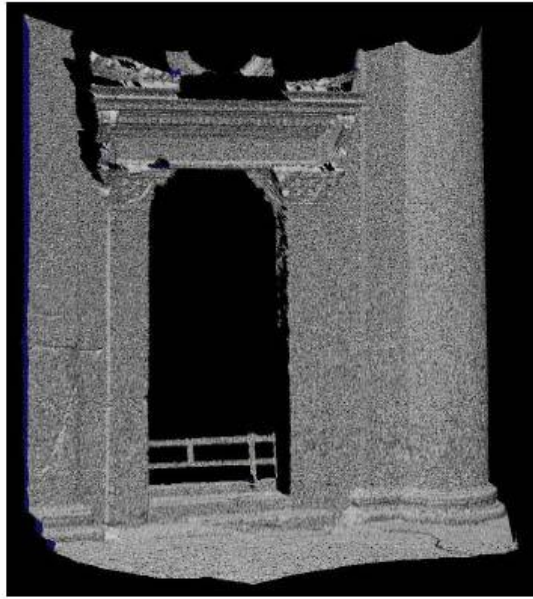


Figure 6. Meshed model for the left door

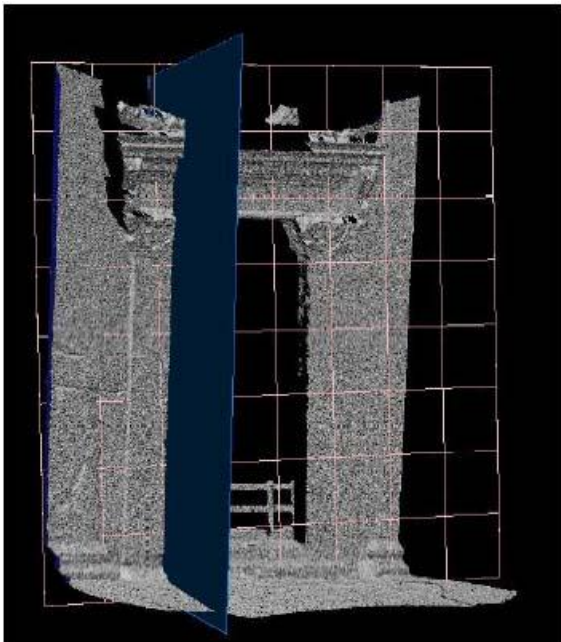


Figure 7. Two intersecting planar surfaces.



Figure 8. The distance image projected on the corresponding image.

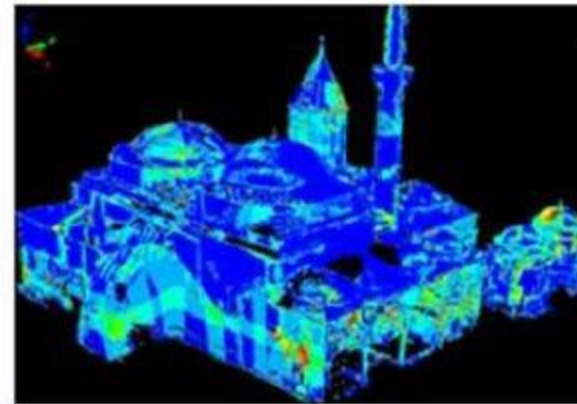
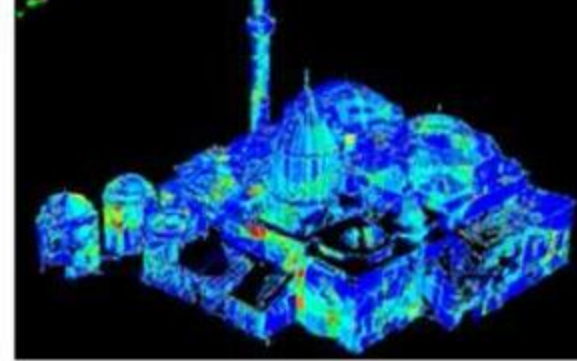
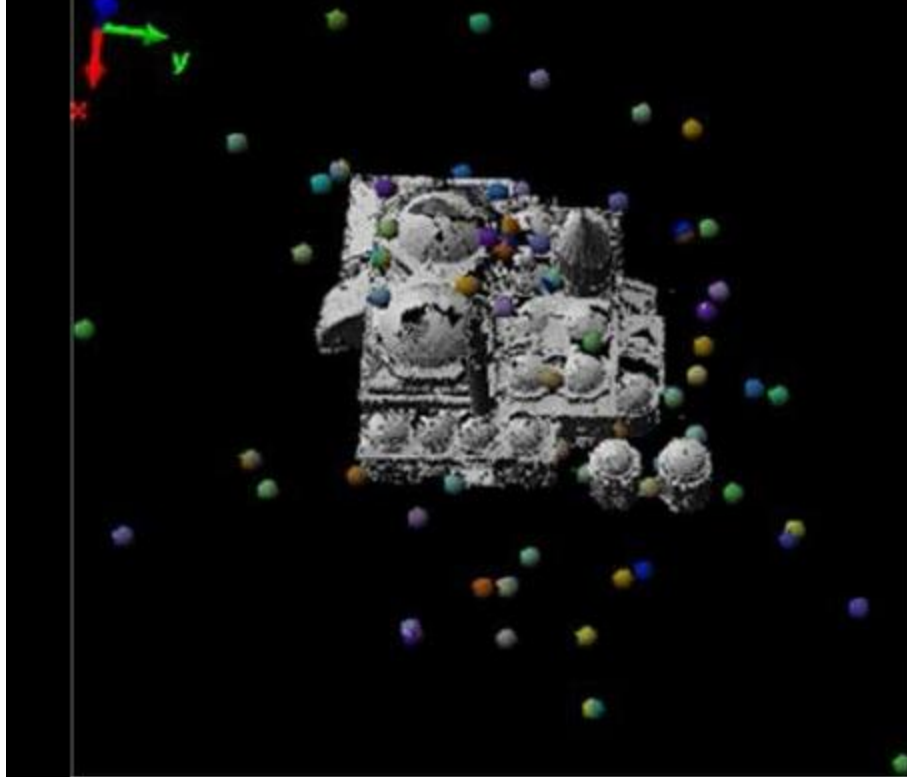


# Muzeum Mevlâna – Konya, Turecko



# Muzeum Mevlâna

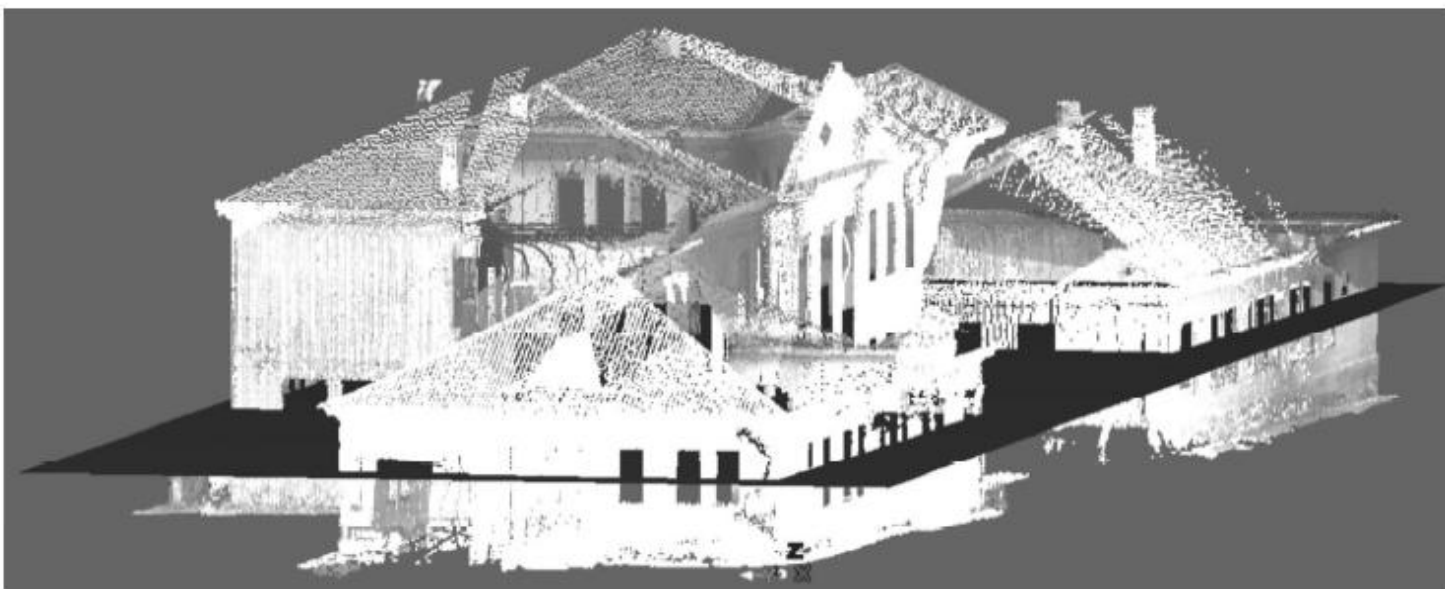
Kontrolní linie	skutečná vzdálenost [m]	skan [m]	rozdíl [m]
522–525	13.716	13.705	−0.011
525–510	3.066	3.052	−0.014
510–521	8.880	8.902	0.021
521–524	4.207	4.218	0.011
524–523	6.314	6.278	−0.035



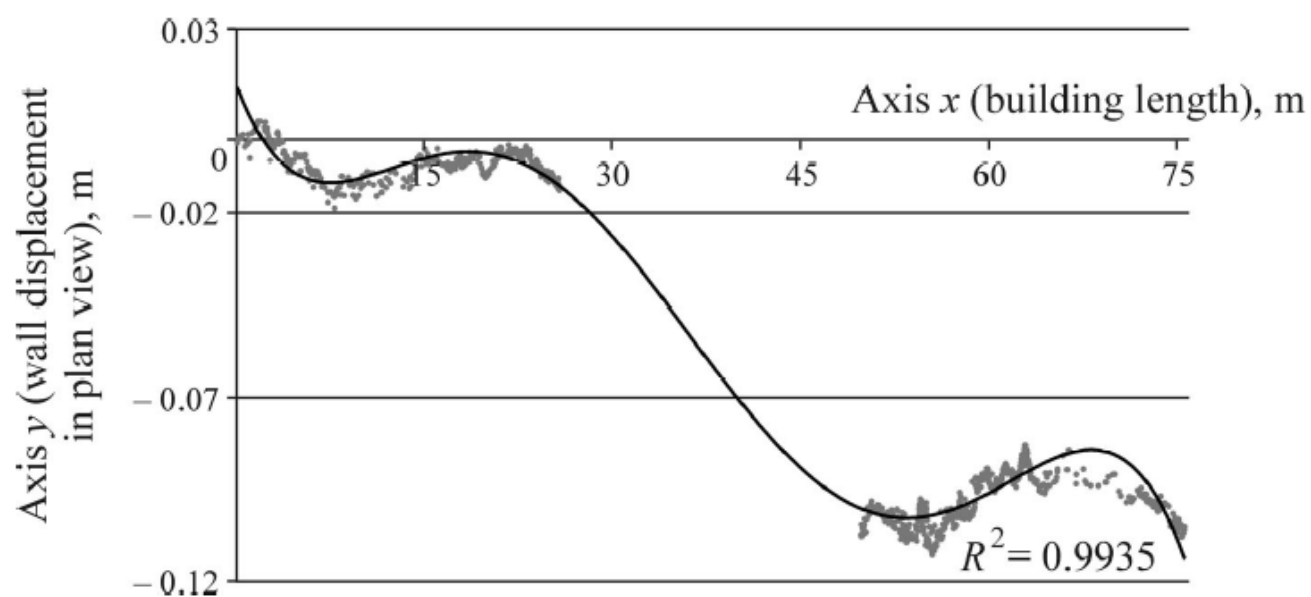
## Sledování – odhalení posunutí budov



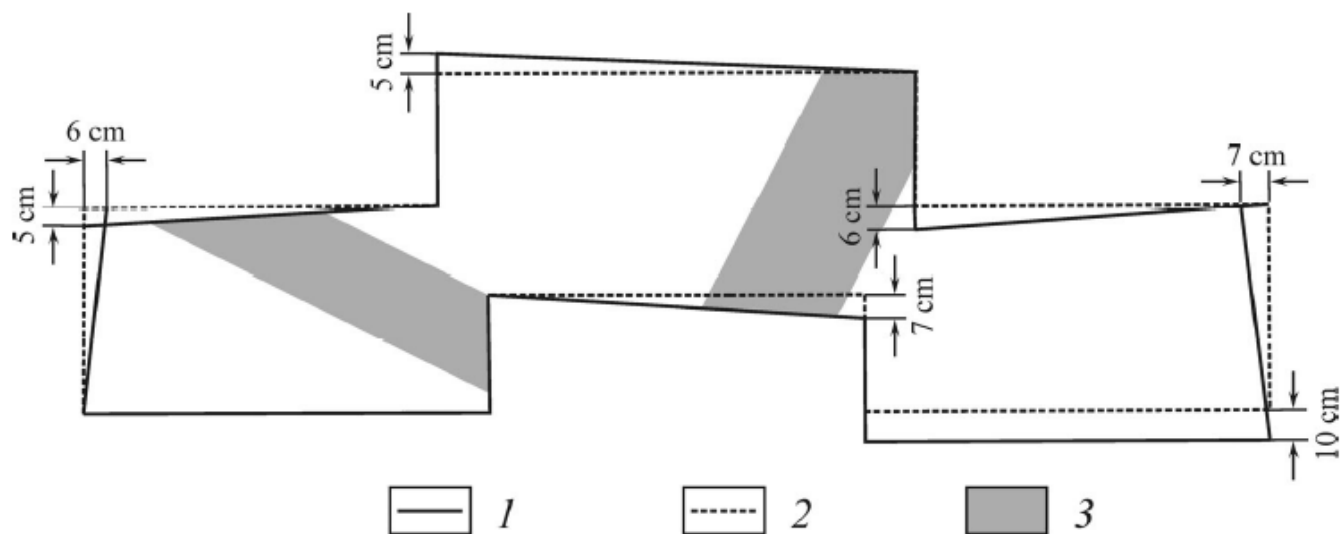
**Fig. 1.** Structural damage of a building front: 1—cracking, side wing, ground floor; 2—damage in the central part, first floor.



**Fig. 2.** Cloud of check points in the scan building.

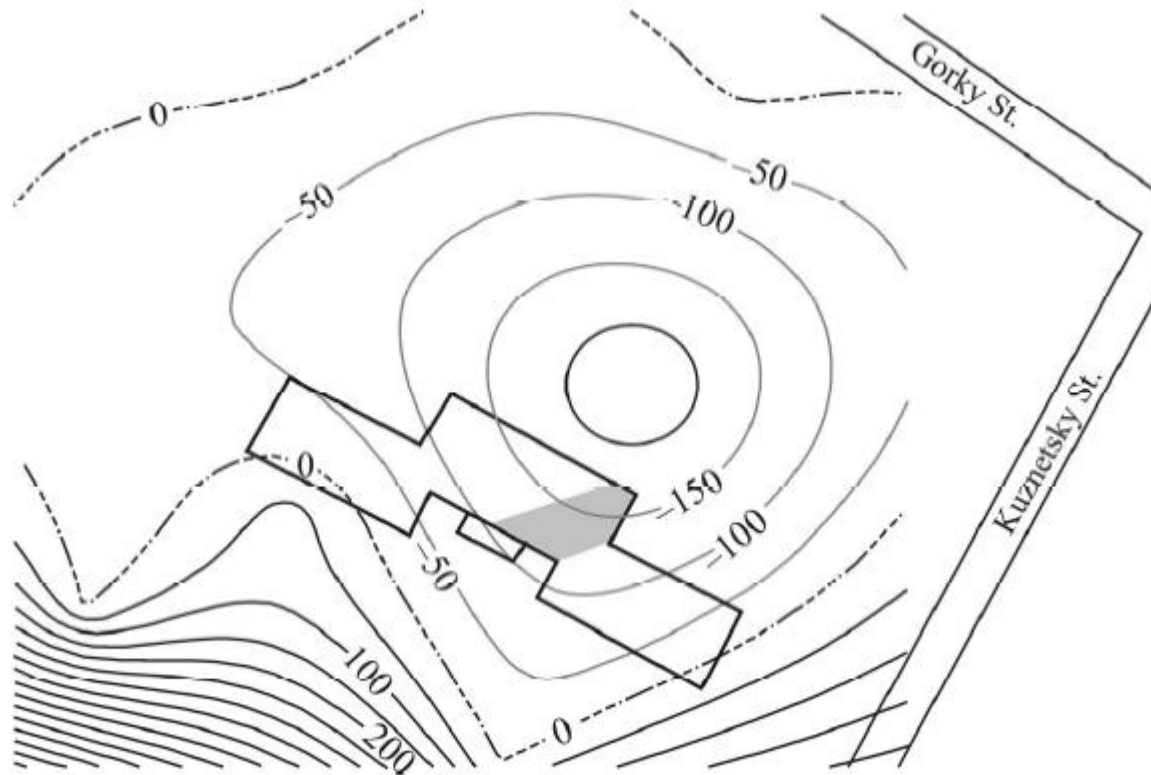


**Fig. 3.** Lateral displacement of the long wall of the building relative to the preset vertical plane.



**Fig. 4.** Plane view of the building displacement relative to the design perimeter: 1—factual perimeter; 2—design perimeter; 3—most cracked areas.

## Terénní situace



**Fig. 7.** Level lines of  $\sigma$  in the rock mass in the area of the analyzed building between 2005 and 2011.

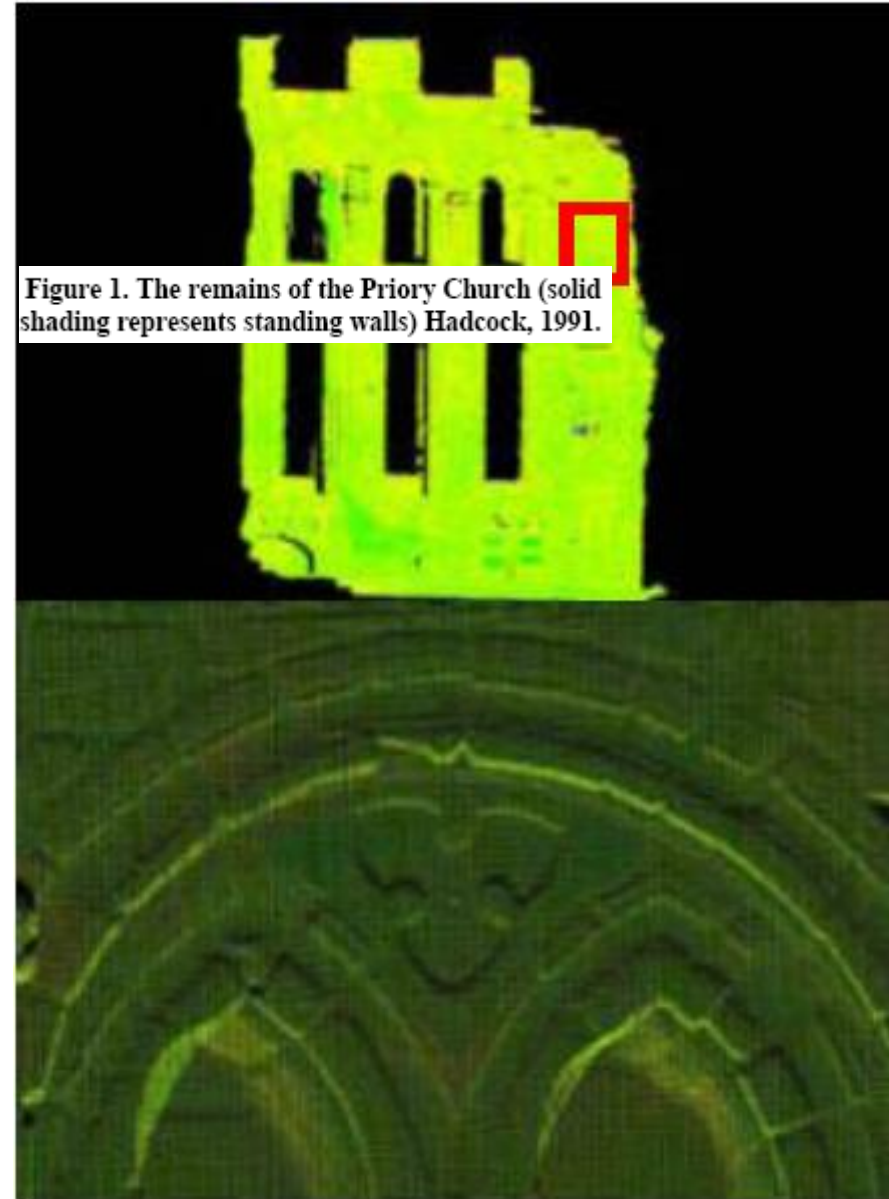


**Figure 12:** Photograph of a plaster statue of the Egyptian king (left) and the shaded image of the modelled result (right). The noise is broken.



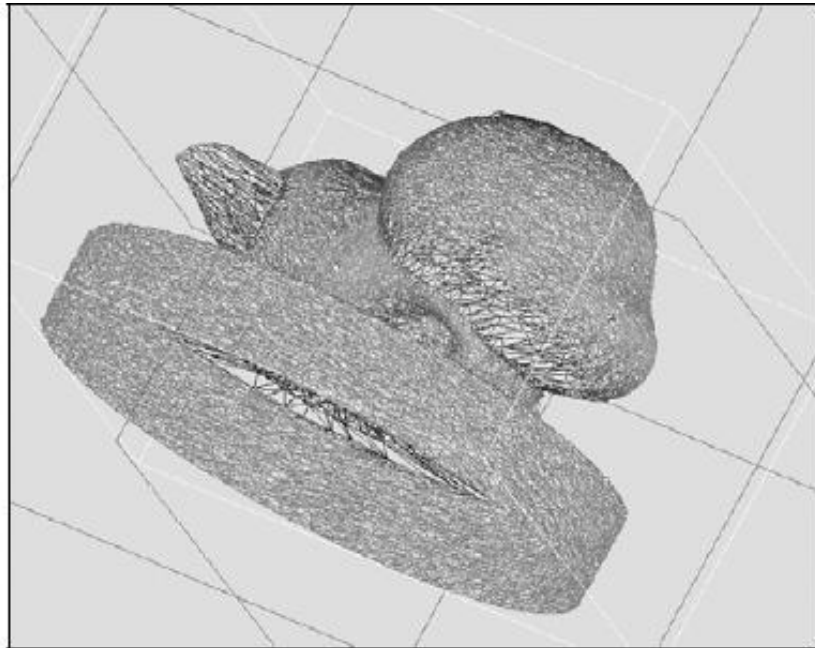
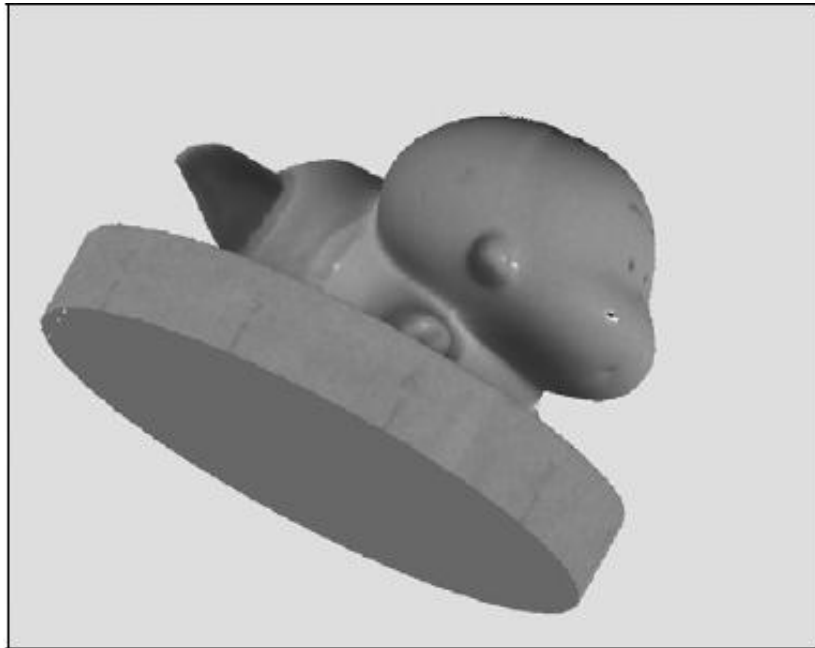
**Figure 13:** A trial of the nose restoration. Three noses (top left, top right and bottom left) are implanted from other reconstructed models and the last (bottom right) is restored by using repetitive depth-to-depth operators.

rekonstrukce

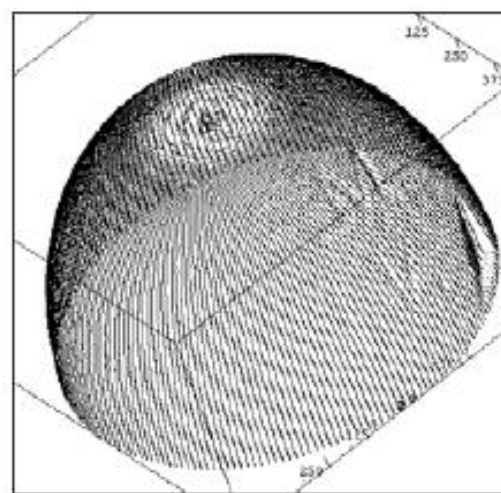
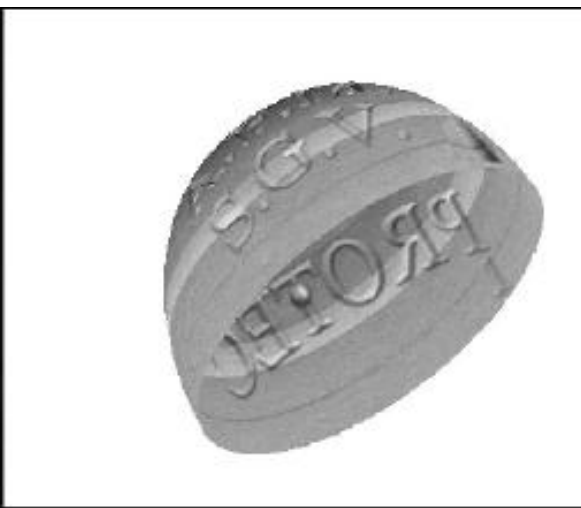


**Figure 1.** The remains of the Priory Church (solid shading represents standing walls) Hadcock, 1991.

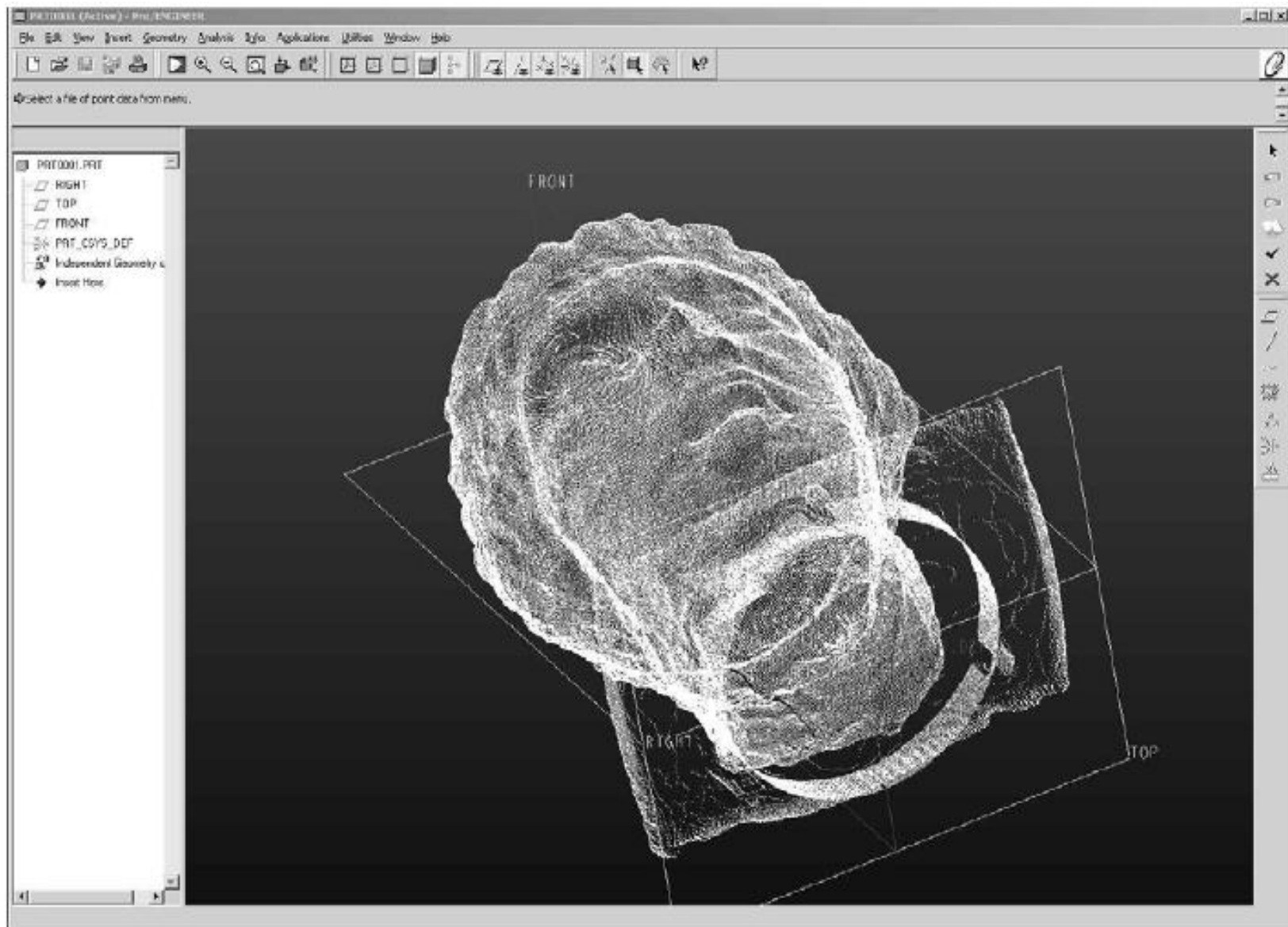
**Figure 2** A background scan, top, and a detail scan, below, of the area marked with a rectangle.



**Figure 5.** 3D reconstruction of a china knick-knack from a rotational scan. On the right, a high resolution model, using reflectivity information to provide a photographic-like hyper realistic aspect. On the left, the same model in wireframe visualization mode after applying a severe decimation of the number of triangles to 10% of the initial value.



**Figure 6.** Left to right : A wooden object, its 3D image (intensity + phase), its CAD model



**Figure 7.** 3D reconstruction of Emperor Constantine's marble head (from Frascati Museum) seen from the bottom. The chosen visualization mode (point cloud) allows to see also the back of the surface. Data were collected by the AM-LR from 3 different points of view at  $120^\circ$  along an axis.

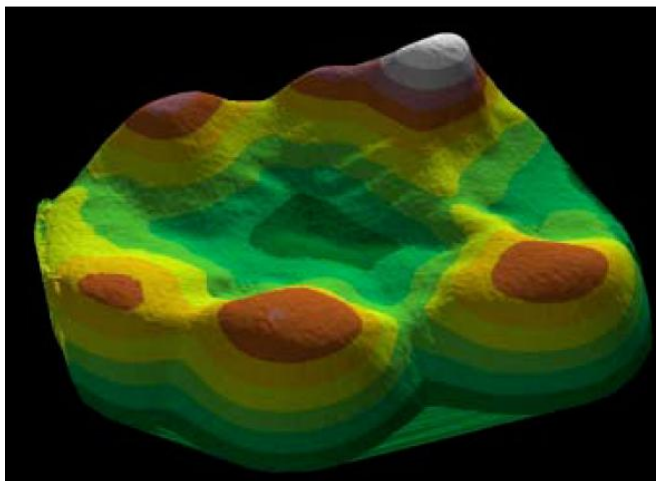


## Muzeum bible Washington, D.C.



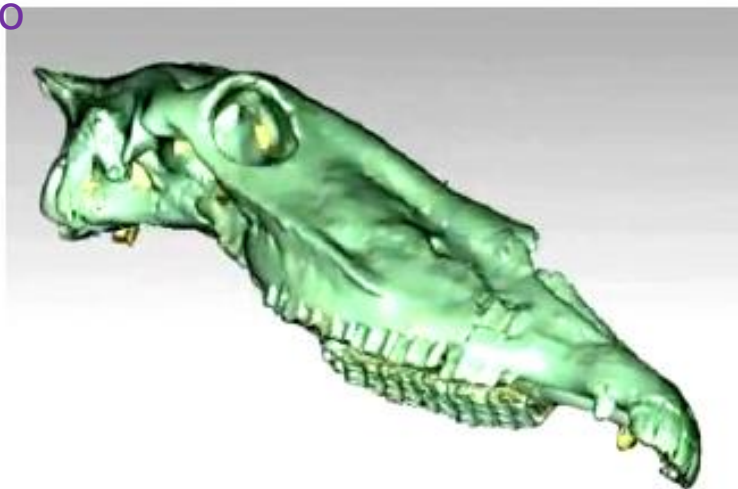
Tabulka s klínovým písmem, 2000 let př. K., Mezopotámie

## Cleveland Museum of Natural History



Šimpanzí zub: 7 dole

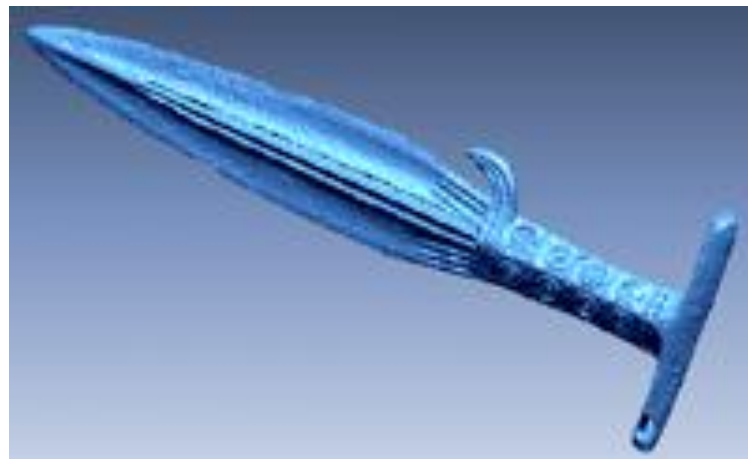
## Hagerman Fossil Beds National Monument, Idaho



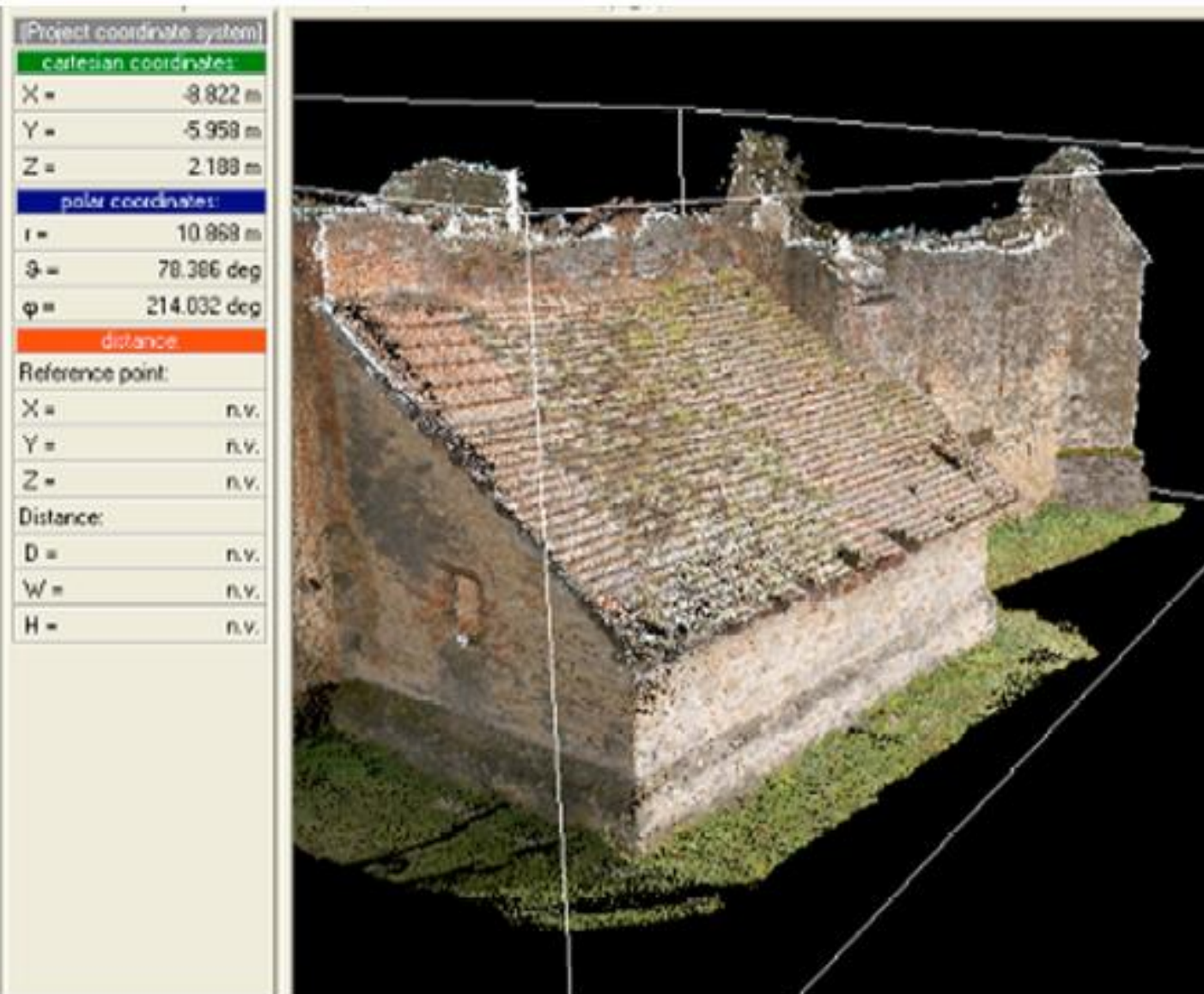
Hagermanův kůň (*Equus simplicidens*) – lebka, 3 mil. let, velmi podrobný sken (30 min.)

<https://www.laserdesign.com/category/case-studies/page/4/>

## Etn.Qiang, sev. Se-čuan, 5. století př. K.



Čínská 27cm bronzová dýka



**Figure 1-2.**

The medieval church of Rádpusztá: side view and air view – a half-day project on site with a few days of post-processing

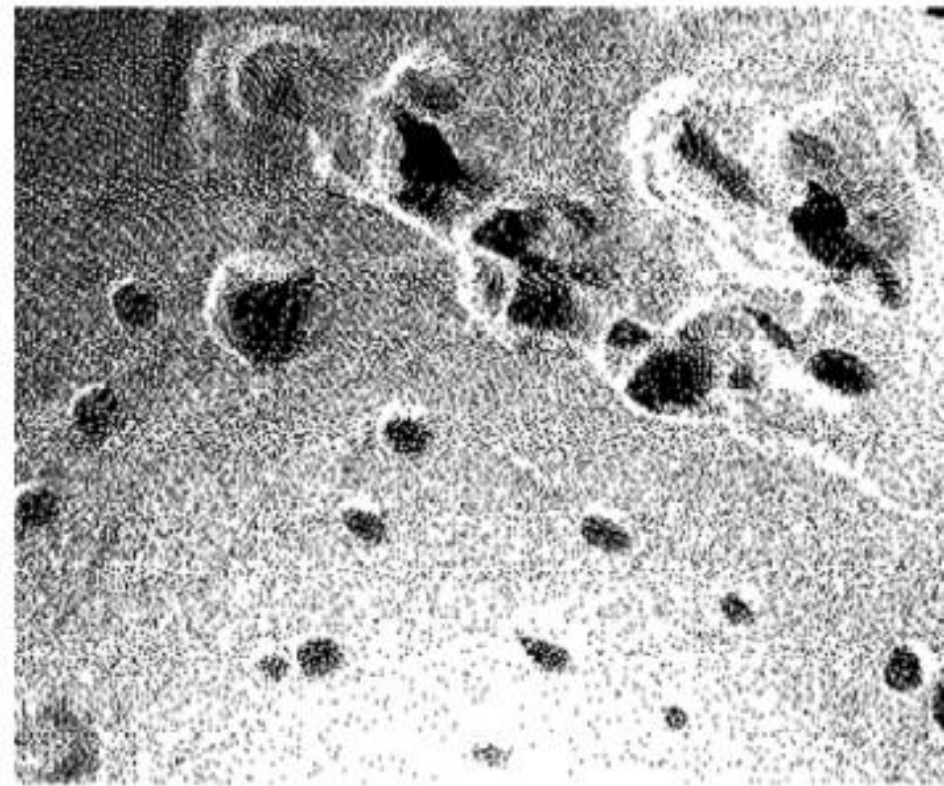
# Skenování krajiny





**Figure 3.**

The medieval castle of Rezi: air view – a half-day project on site with two days of post-processing



**Figure 4-5.**

Detail of a Neolithic settlement at Balatonszárszó: air photo and the 3D laser scanning picture (to eliminate shadow would be a very time consuming, and therefore very expensive process).



*Figure 8. Relief shaded image with 1m interval raster contours showing the topographic location of the Neolithic long barrows (yellow squares) around the dry valley system in the western part of the WHS, and the location of Bush Barrow (red arrow). Linear barrow cemeteries on ridgelines: Winterbourne Stoke (top left) and Normanton Down (mainly to right of Bush Barrow).*

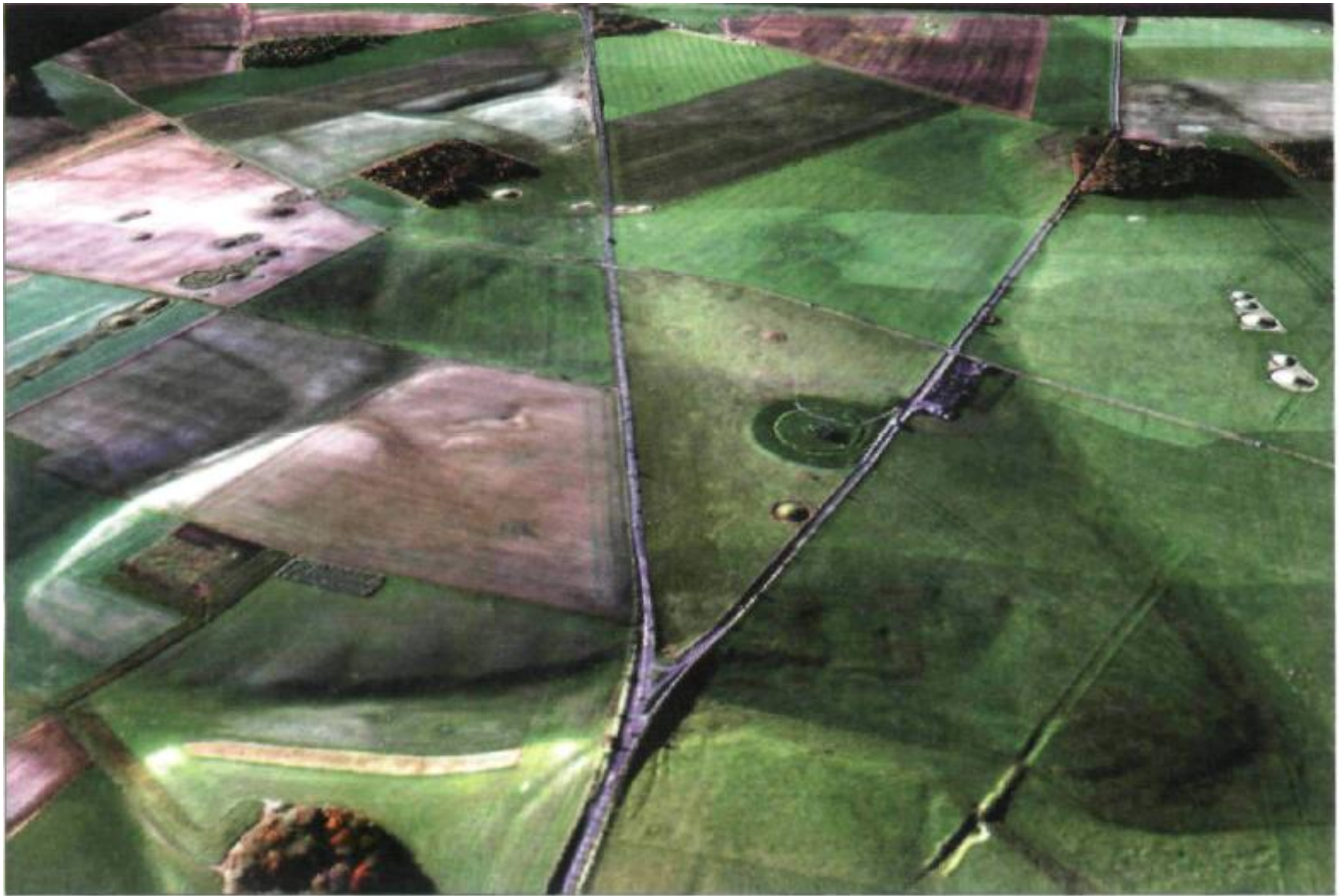


Figure 10. Digital visualisation of the Stonehenge landscape looking westward along the A303 highway from above Stonehenge Bottom. 39

## Nově i fotografie z dronů

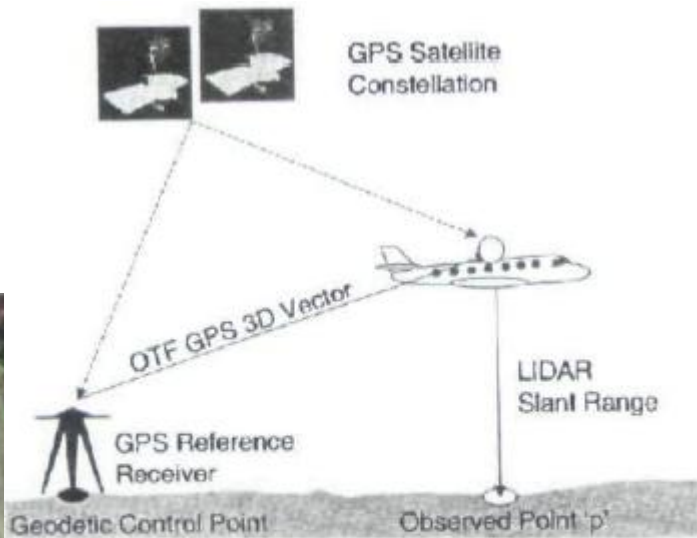


Figure 1. Diagram of GPS frame of reference for calculating the position of the aircraft, and hence the observed lidar measurement point (after Holden et al. 2002).

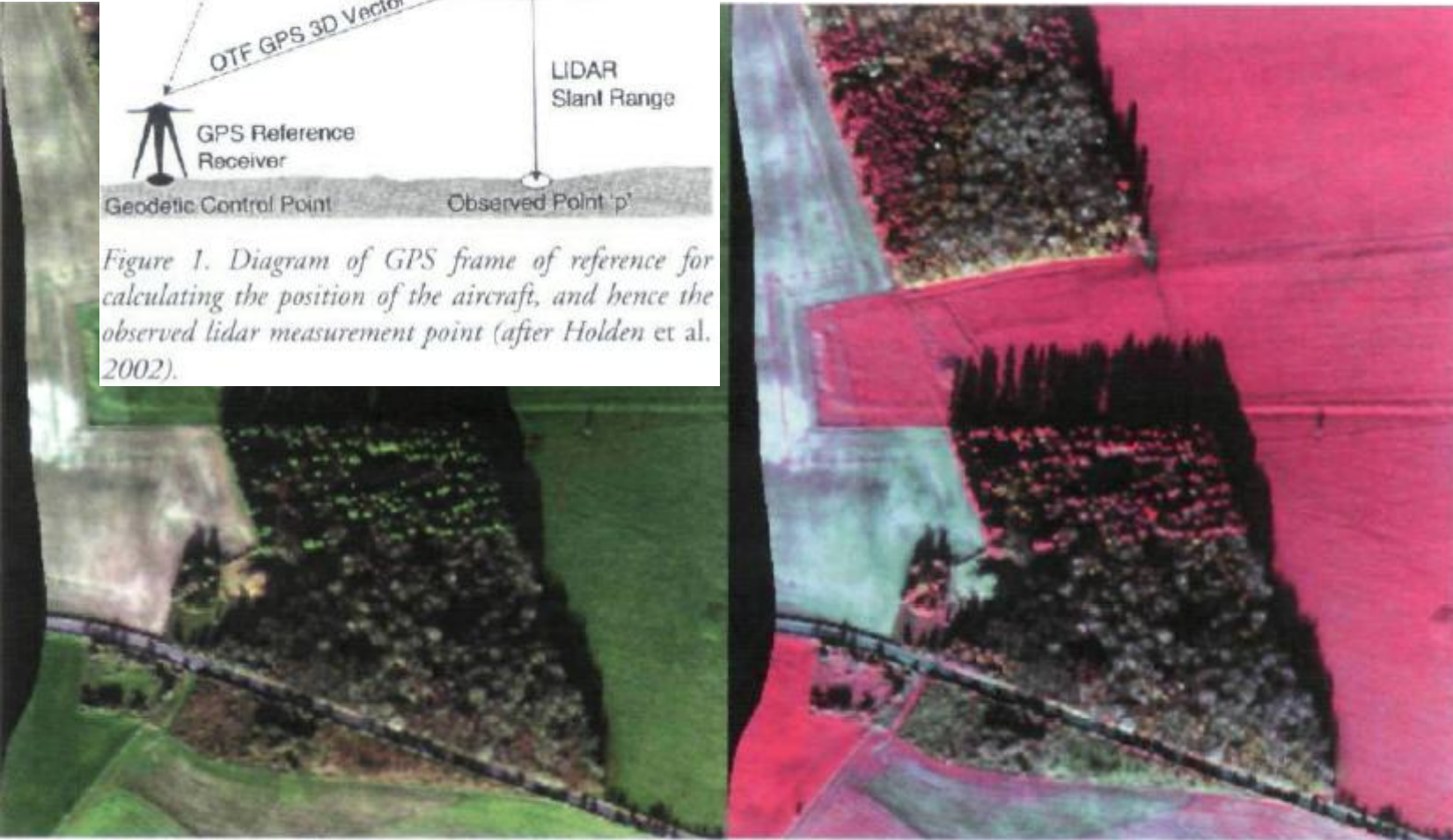


Figure 9. CASI 3 true and false colour images showing the contrast between the coniferous and leafless deciduous trees (two colours) in Fargo Plantation, with the false colour image, generated from, green, red and infrared bands emphasising the bare soil of the narrow footpath across the Cursus at the eastern edge of the plantation.



# 3D model hrobu Richarda III. (1483-1485): parkoviště Leicester 2012



fotogrammetrie

<https://sketchfab.com/models/00d23c7defd0476db1a36c08728fa60f>

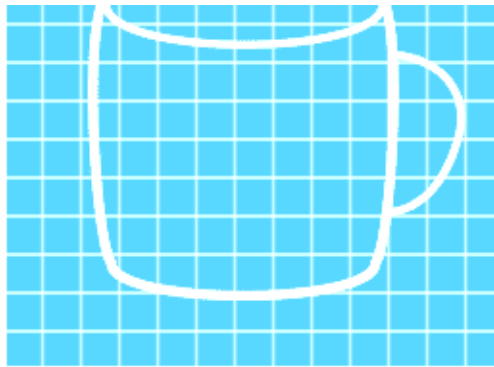
# 3D tisk

Prototypy, náhradní díly, modely v architektuře, zdravotnictví (protetika), zábava a umění (sochy, rekvizity, kulisy).

Rekonstrukce fosilií v paleontologii, kopie artefaktů v archeologii, rekonstrukce kostí a částí těl ve forenzní patologii, rekonstrukce těžce poškozených důkazů zločinů.

✓ **Spojení laserového skenování a poté 3D tisku naskenovaného předmětu/postavy => práce s kopií z 3D tiskárny místo opotřebovávání originálu 😊**

3D skener v mobilu



Start with a 3D CAD file  
either by creating the

[https://youtu.be/VLaZ\\_jDuZ30](https://youtu.be/VLaZ_jDuZ30)

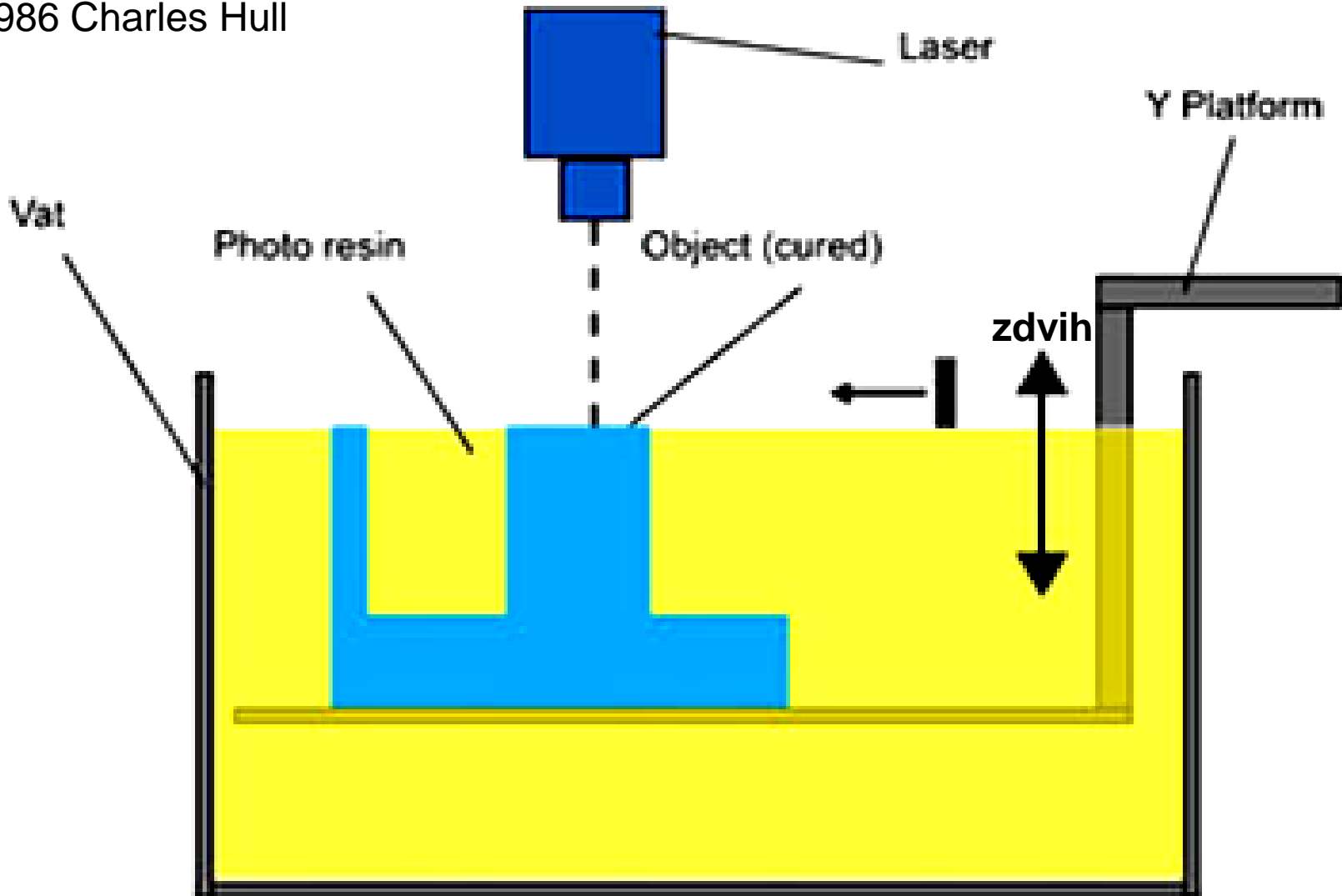
<https://youtu.be/NPYFDYzYfAw>

<https://youtu.be/rfZamq2zjHM>

## Fotopolymerizace v nádobě

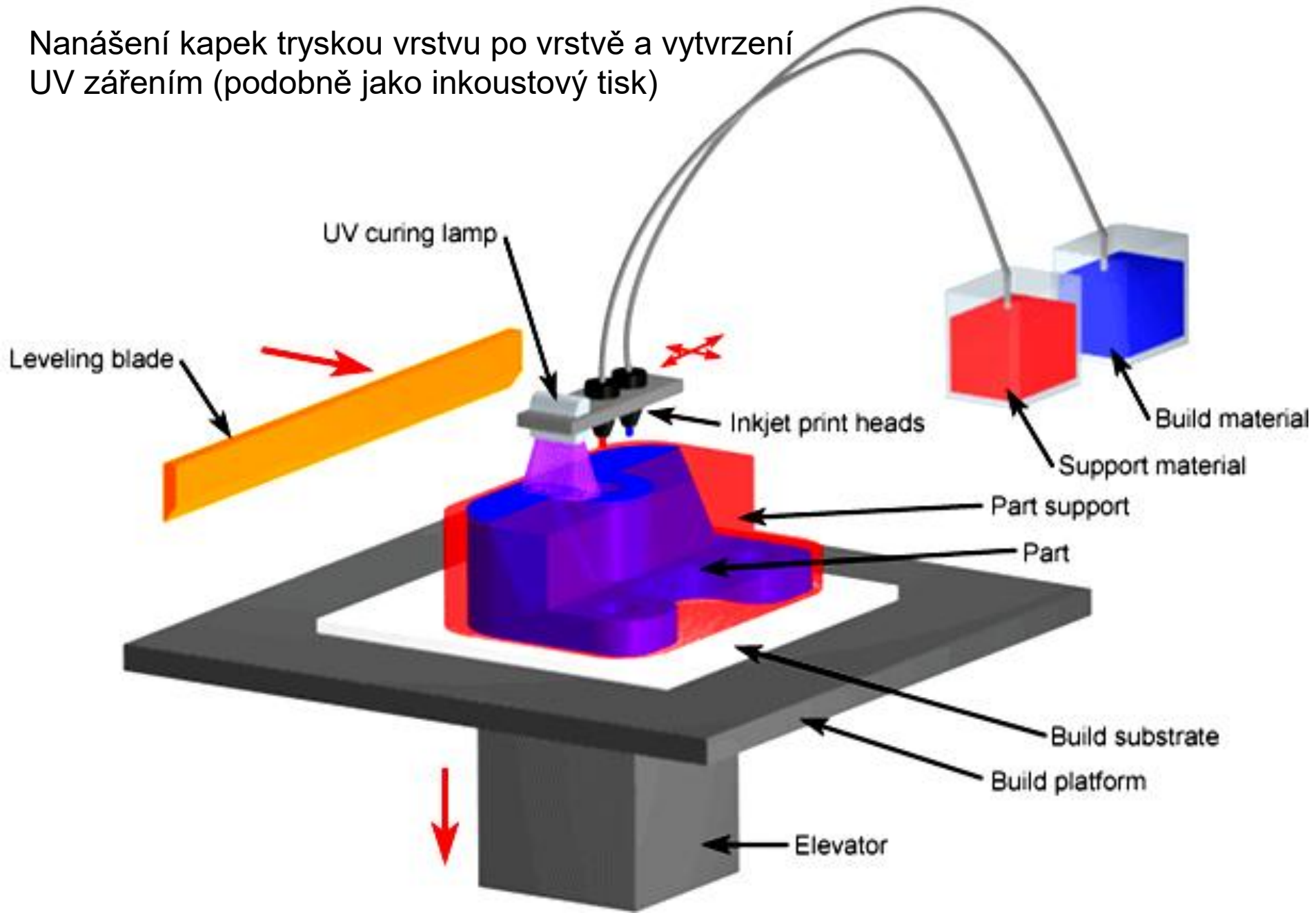
**Stereolitografie (SLA)** Nádrž s s kapalnou pryskyřicí (fotopolymer opracovatelný UV), v kapalně pryskyřici – vytvrzování kapaliny vrstvu po vrstvě, UV laser – vytvrzení kapalně pryskyřice a spojení s nižší vrstvou, výška 0,05 – 0,15 mm.

1986 Charles Hull



# Material Jetting - tryskání

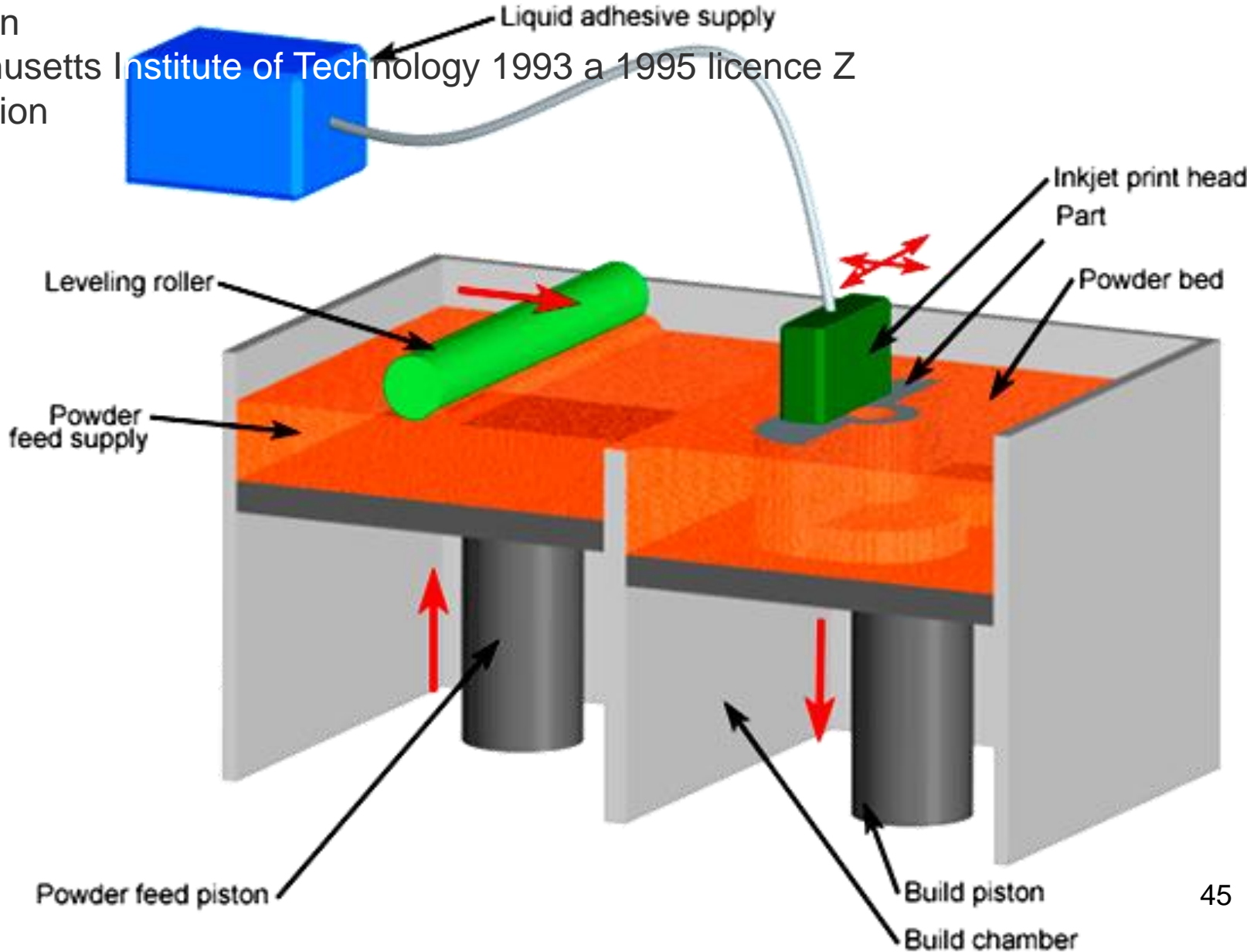
Nanášení kapek tryskou vrstvu po vrstvě a vytvrzení UV zářením (podobně jako inkoustový tisk)



# Spojování prášku - Binder Jetting

Plošné nanášení prášku vrstva po vrstvě, v každé vrstvě vykreslen obrazec kapalným lepidlem nanášeným tryskou, které spojí prášek, nakonec je přebytečný okolní prášek odstraněn

Massachusetts Institute of Technology 1993 a 1995 licence Z Corporation

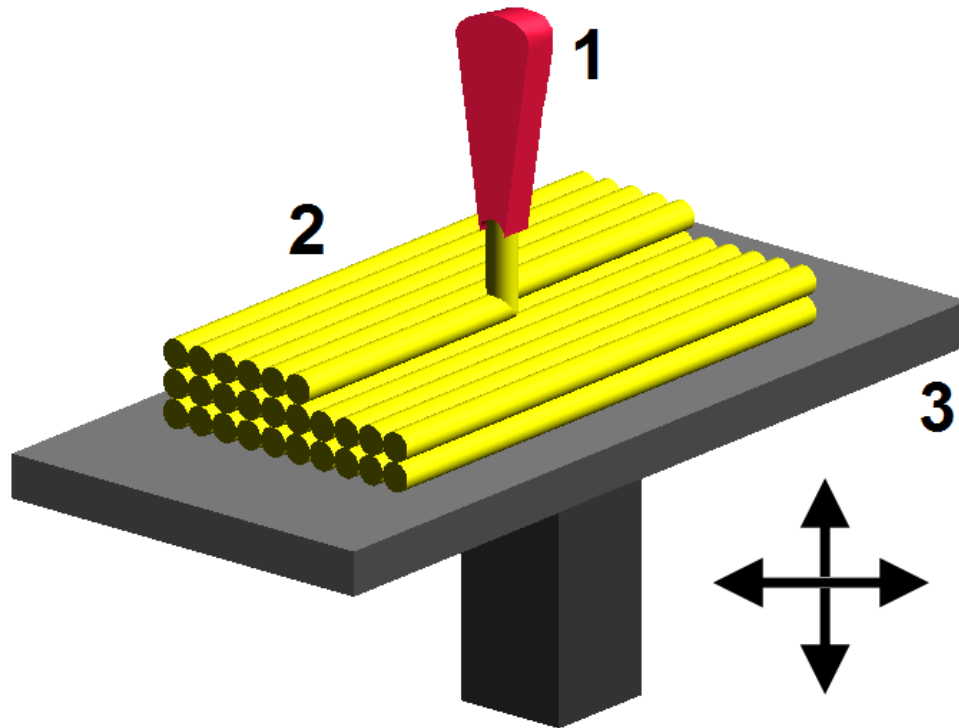


# Vytlačování materiálu - Material Extrusion

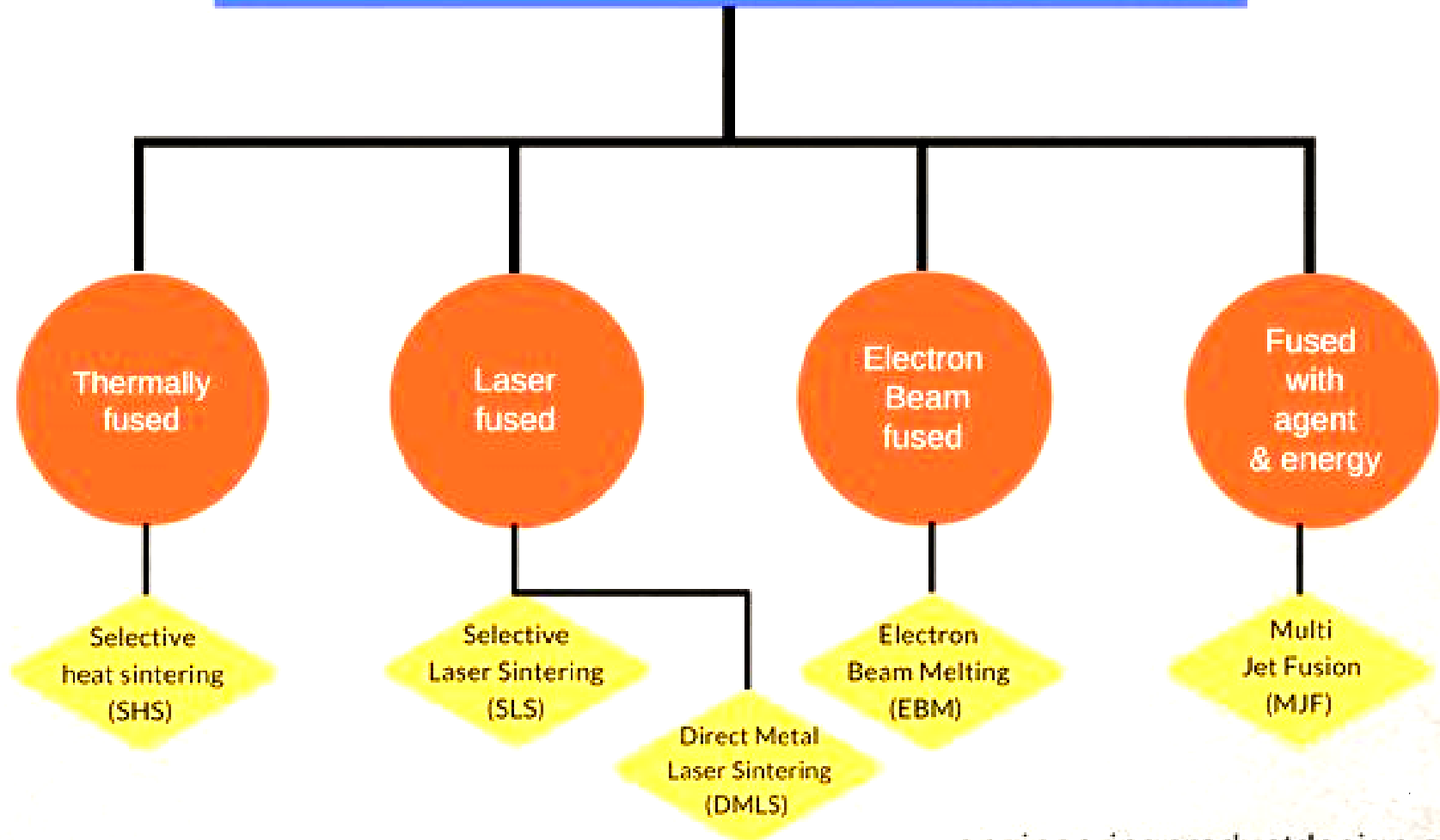
## Nejužívanější - Fused deposition modeling (FDM)

Odvíjení plastového (často ABS - Acrylonitrile Butadiene Styrene a PLA - Polylactic acid) nebo kovového vlákna z cívky do trysky – roztavení a vytlačení na daná místa ve vrstvě – 2 materiály najednou: formovací a podpůrný, tvrdnutí ihned po vytlačení.

Scott Crump 80. léta, fa Stratasys 1988.



# Powder Bed Fusion

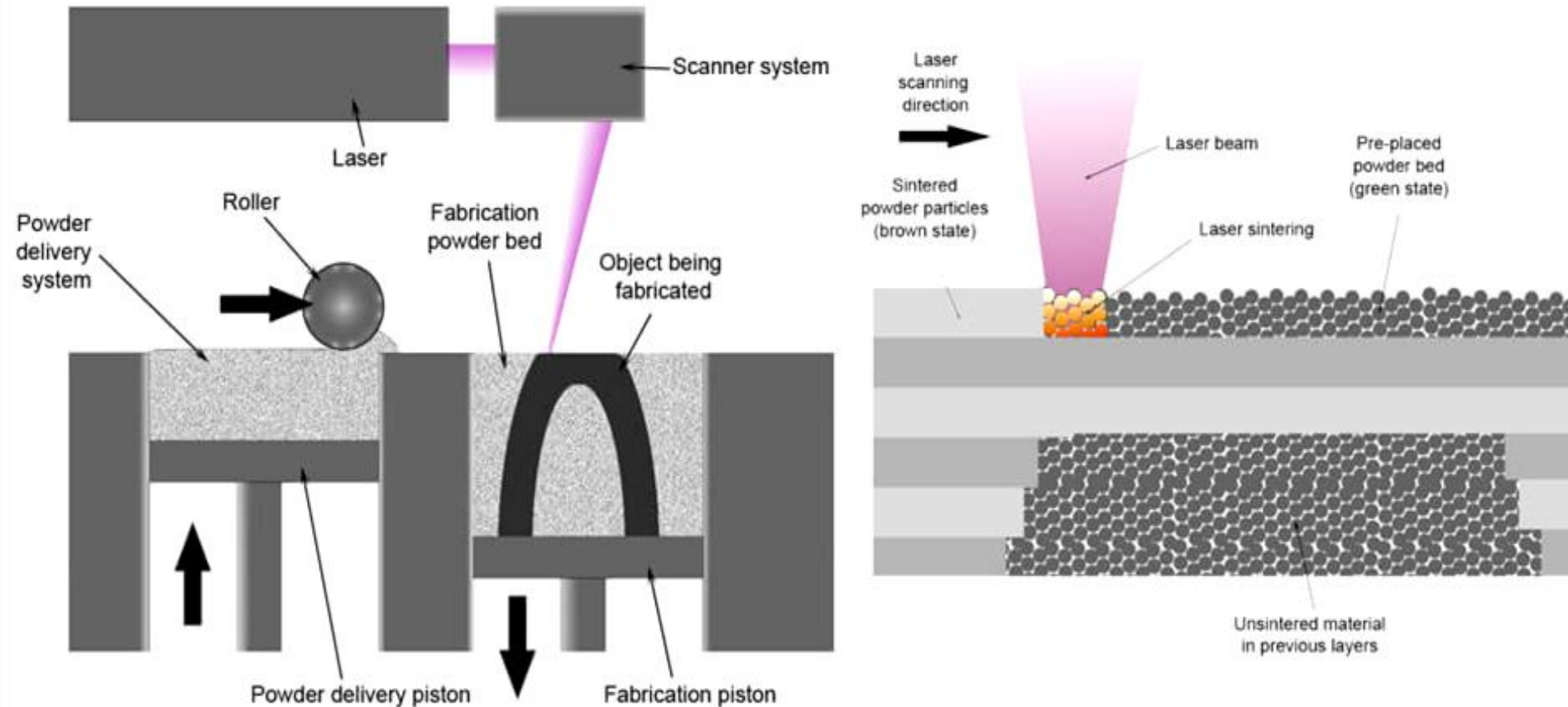


# Fúzní práškové lože - Powder Bed Fusion

Selektivní laserové sinterování (spékání) - Selective laser sintering (SLS): výkonný laser ( $\text{CO}_2$ , Nd:YAG, Yb vláknový) spojí částice plastu, kovu, keramiky, skla => často nutná finální povrchová úprava

Opětovné využití přebytečného materiálu jako u SLA (stereolitografie)

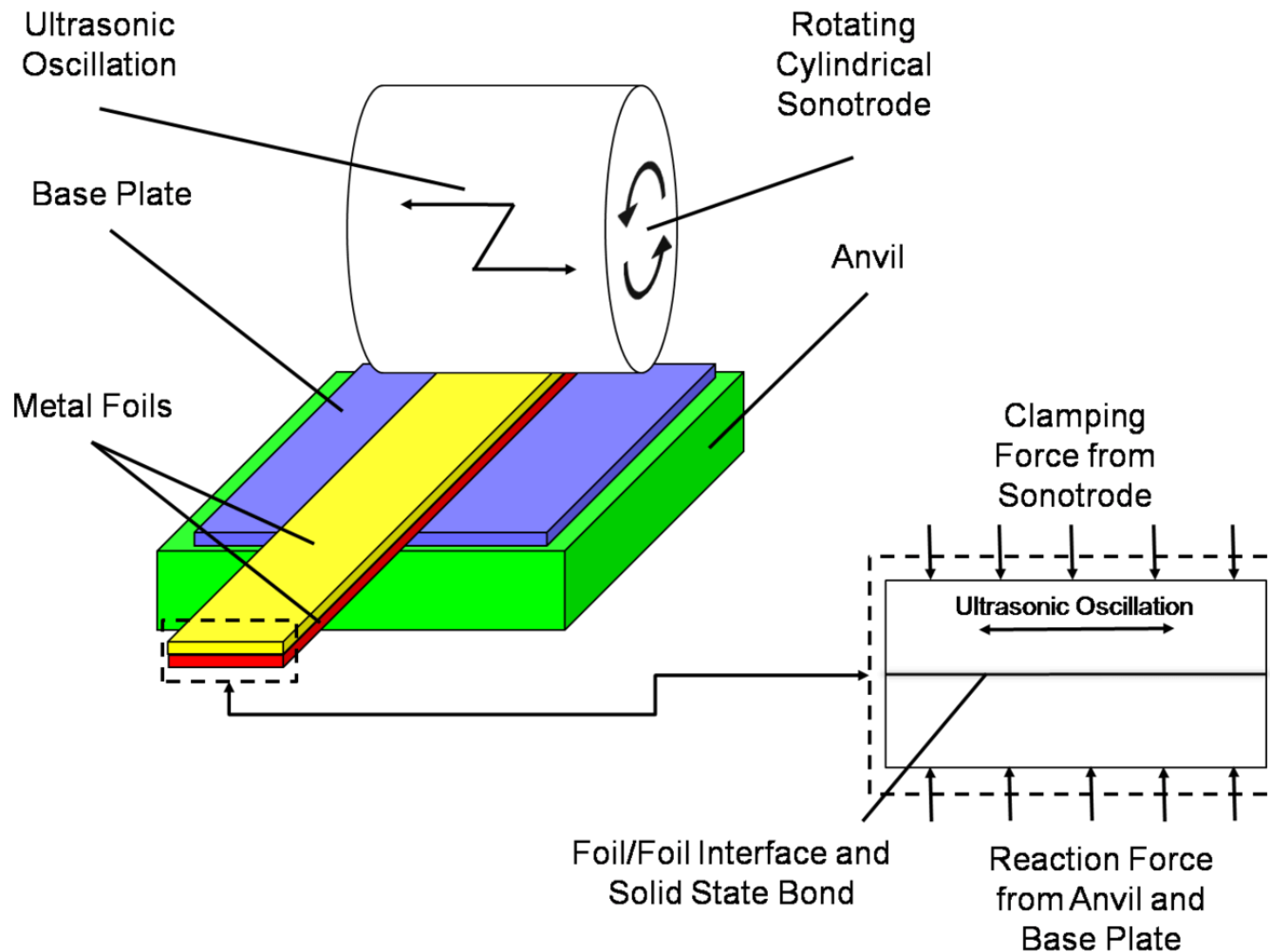
Dr. Carl Deckard, University of Texas, 80. léta, s podporou DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency)





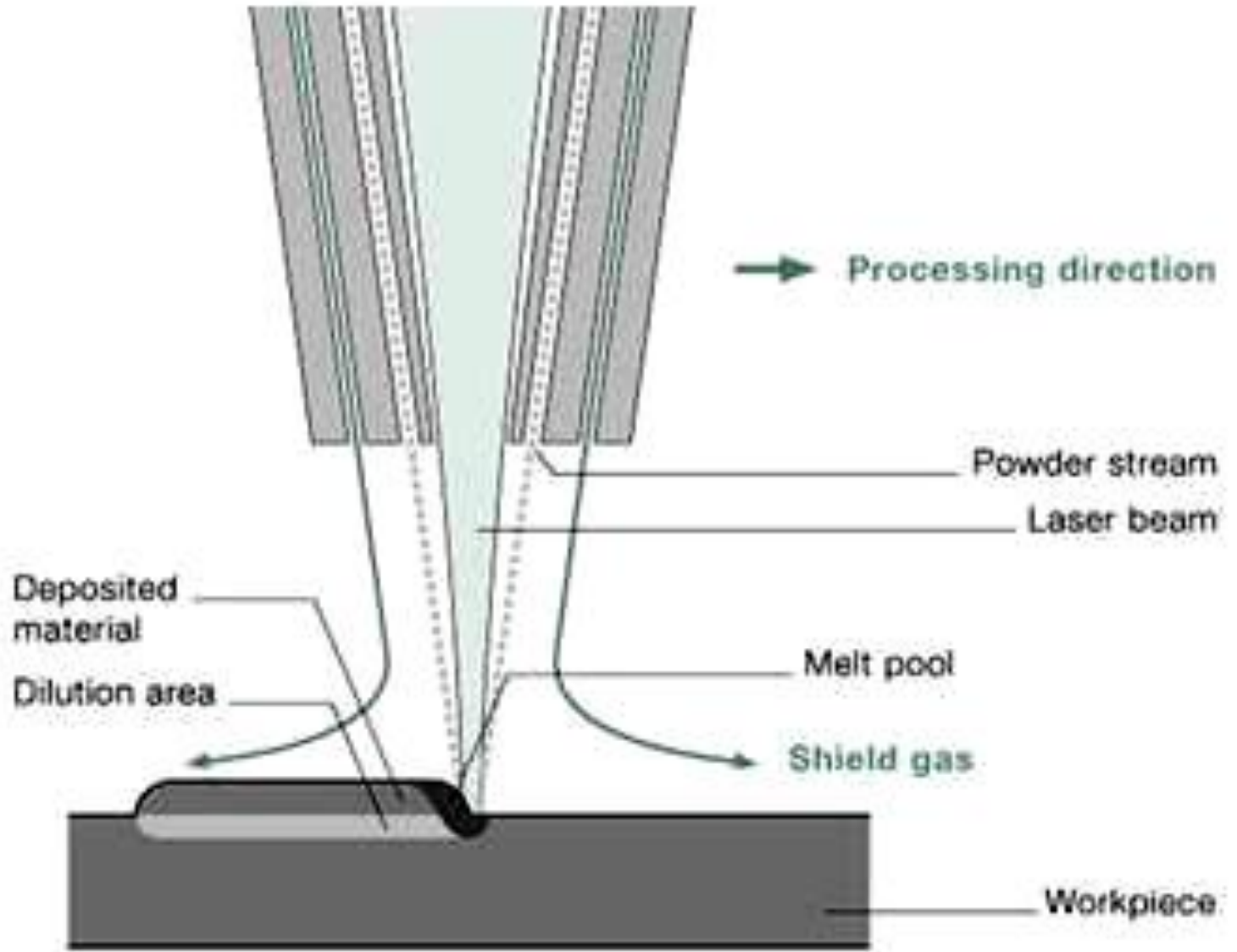
## Laminace - Sheet Lamination

Spojování nanášených plátů externí silou: kov, papír (spojováno lepidlem), polymer. Ultrazvukové spájení a vyřezání vrstvy CNC do požadovaného tvaru. Např. fa Mcor Technologies.



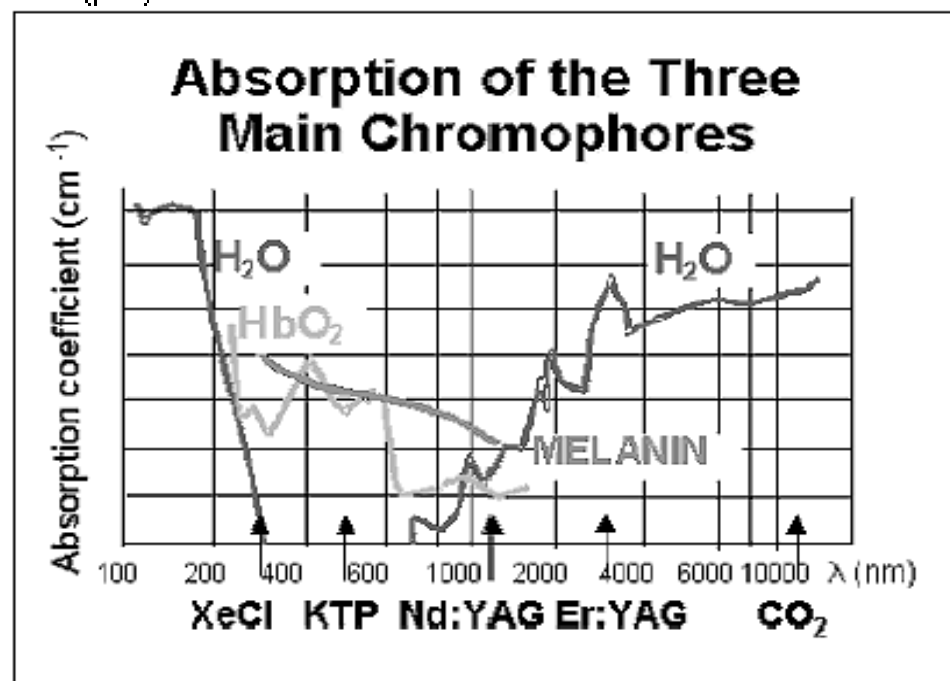
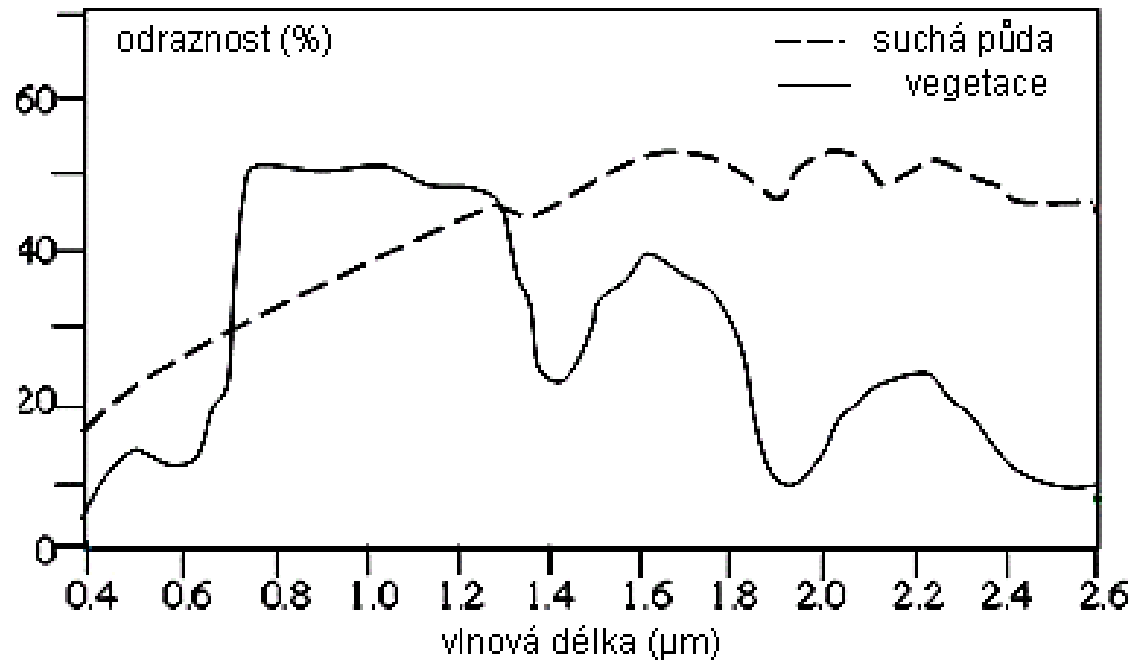
# Directed Energy Deposition

Výroba užitím pokročilých kovových materiálů. Tryska nanáší kovový prášek nebo drát + tavicí paprsek (laser, elektronový paprsek, obloukové plazma) – taví a tvaruje pevný předmět.

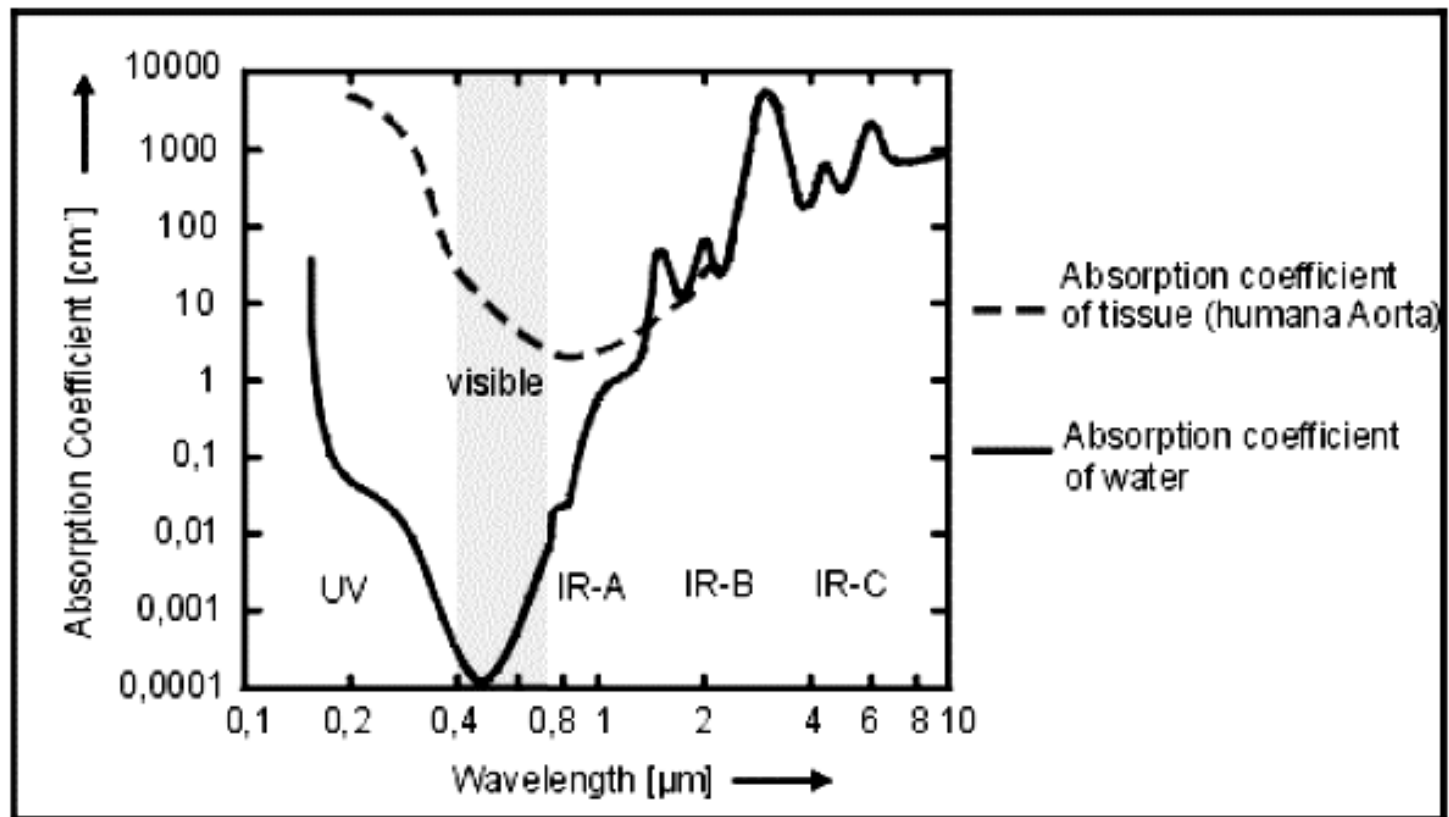


# Lidar – Light Detection And Ranging

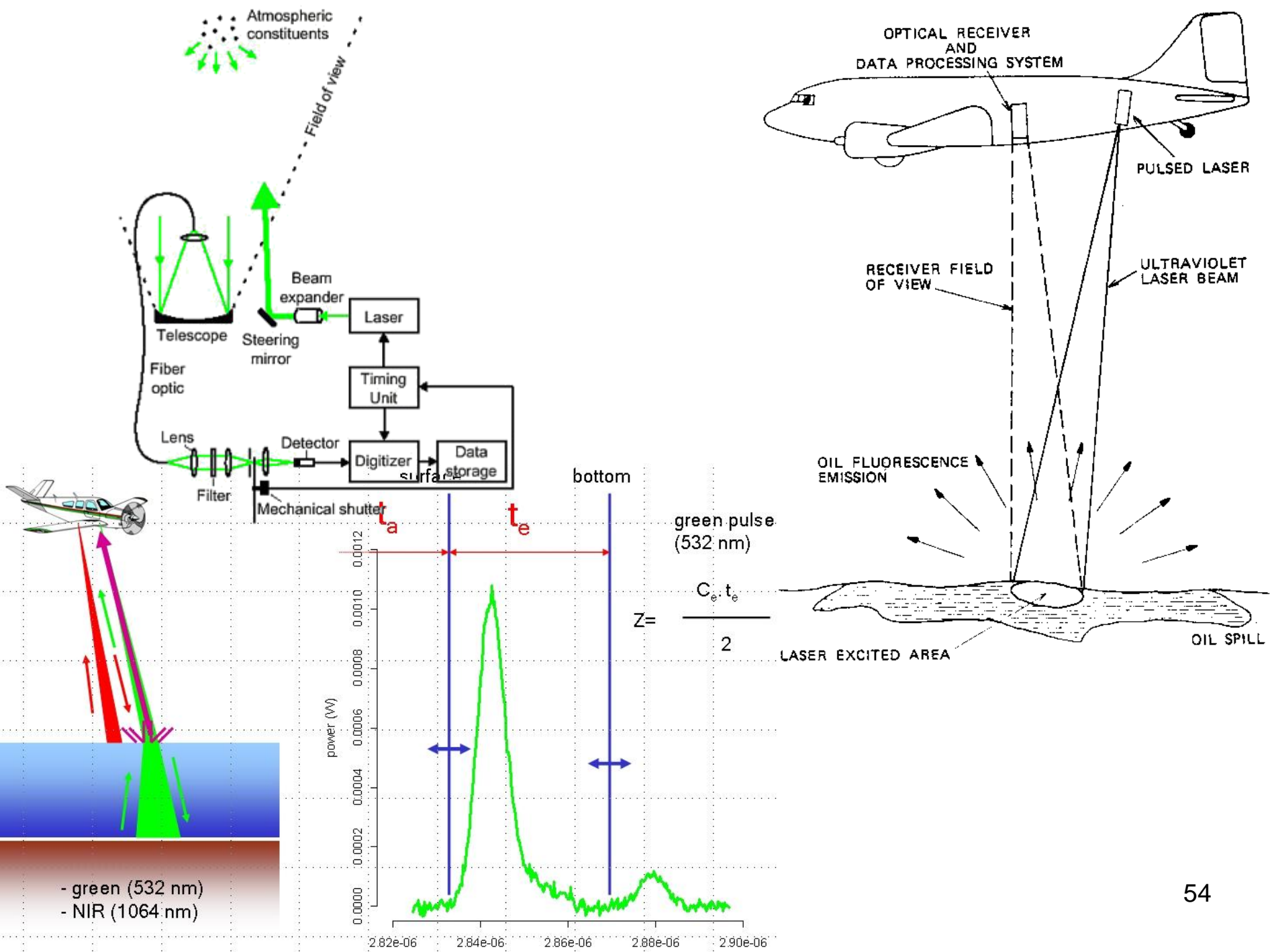
- ❑ Dálkový průzkum pomocí detekce odraženého/rozptýleného laserového nebo fluorescenčního záření,
- ❑ využití pružného rozptylu na aerosolech (Rayleigh  $I \sim 1/\lambda^4$ ),
- ❑ nepružného rozptylu (Raman, IR spektroskopie), doba rozptylu  $10^{-10} - 10^{-12}$  s => vysoké prostorové rozlišení
- ❑ Detekce země-vzduch nebo letadlo-vzduch/země/voda, družice-vzduch/země/voda
- ❑ ***Dálková analýza polutantů – analytický LIDAR:***
  - ✓ Kalibrace na O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>; Př. Raman SO<sub>2</sub>: N<sub>2</sub> laser v noci LOD 1 ppm na 1 km, prostor. přesnost 10 m; fluorescence SO<sub>2</sub>: 301,1 nm, LOD 0,1 ppb na 10m, 10 ppm na 1 km; NO<sub>2</sub>, ethen, bojové plyny: CO<sub>2</sub> laser
- ❑ ***Skenování povrchu – topografický LIDAR:*** archeologie, geolog. průzkum apod... měření vzdáleností: GaAs laser do 1 km, rozlišení 10 cm, Nd:YAG do 10 km, rozlišení 1 m, rubínový l. silné ns pulzy 1 GW, do 1000 km; měří se doba návratu i tvar odraženého pulzu

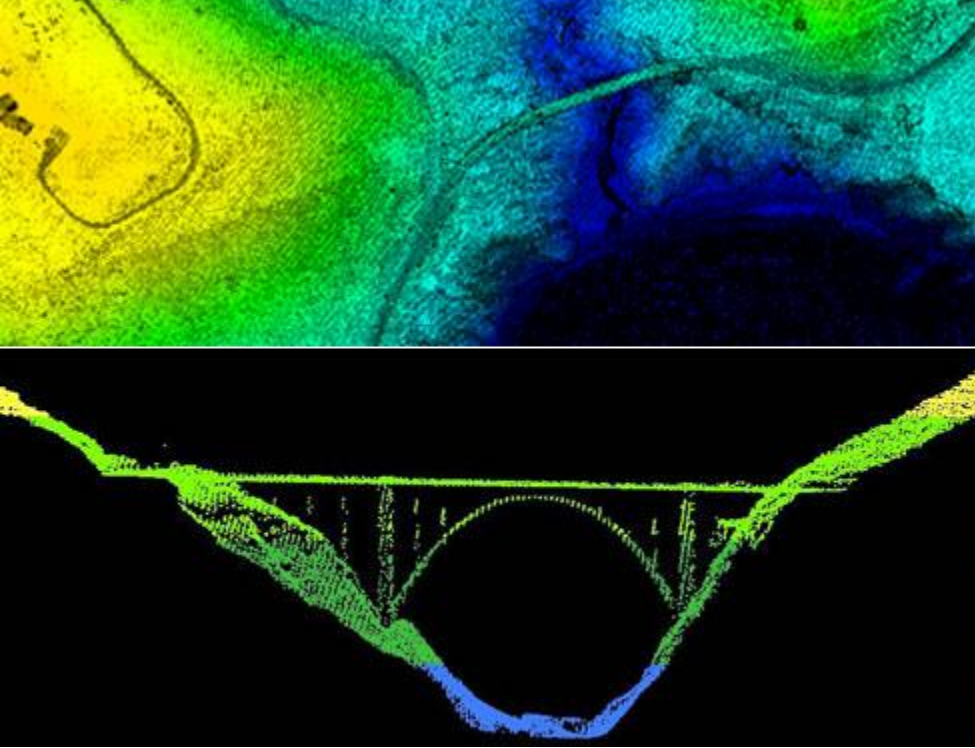


Absorption spectrum of the 3 main chromophores in tissues (water, haemoglobin and melanin)<sup>6</sup>. Arrows mark the emission wavelengths of the main laser sources commercially available.



Absorption coefficient as function of wavelength for water and tissue<sup>6</sup>. It can be seen that the tissue absorption is governed by the water content of the tissue for infrared wavelengths and the absorption characteristics of haemoglobin and other organic molecules in the visible and in the UV. Blood for instance has a strong absorption in the blue and green part of the spectrum, and penetration depth into the skin is largest for the red and near IR wavelengths.



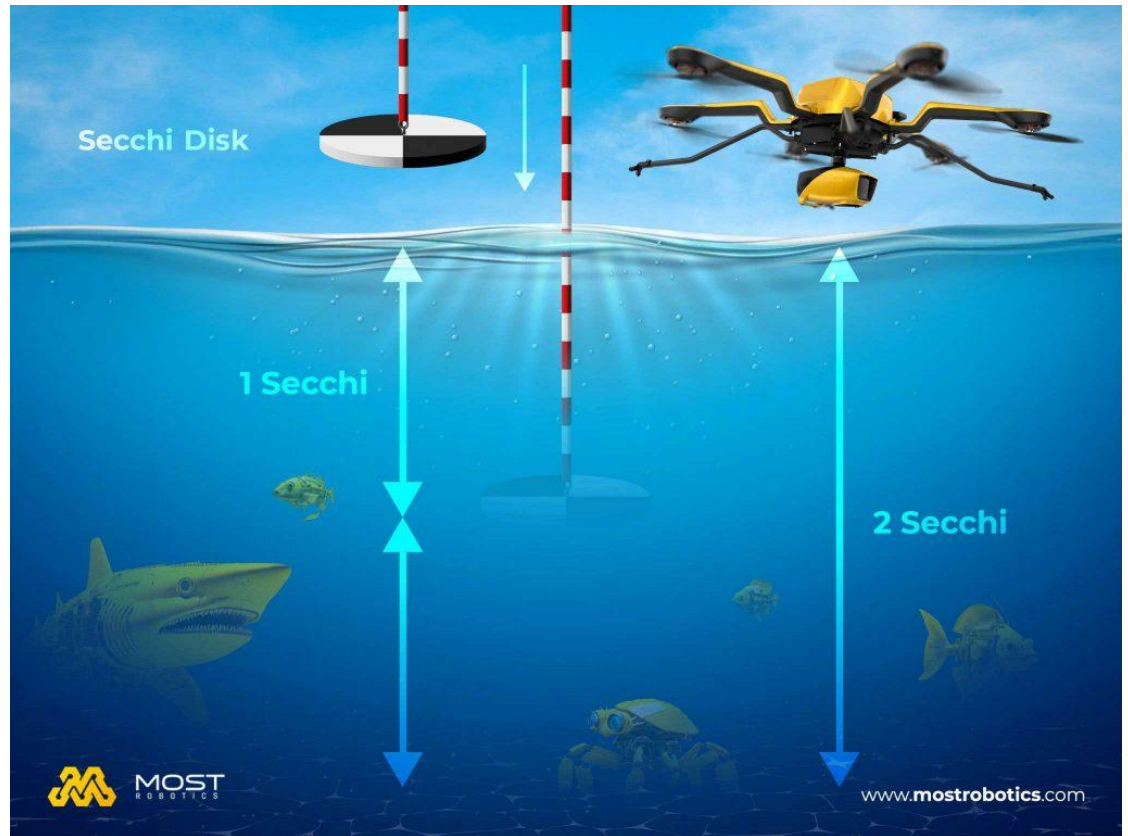


*LiDAR - NOAA survey aircraft: Bixby Bridge, Big Sur, Calif. Here, LiDAR data reveals a top-down (top left) and profile view of Bixby Bridge.*

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)  
<https://geodesy.noaa.gov/INFO/facts/lidar.shtml>

# LIDAR – průzkum pod vodní hladinou (bathymetry)

- ❑ Odráží IR = > zelený laser ve vodě, IR laser pro detekci hladiny
- ❑ Velký rozptyl ve vodě = > dlouhé pulzy 250 ns
- ❑ Rychlost sběru dat ~ kHz
- ❑ Násobně větší výkon laseru než ve vzduchu

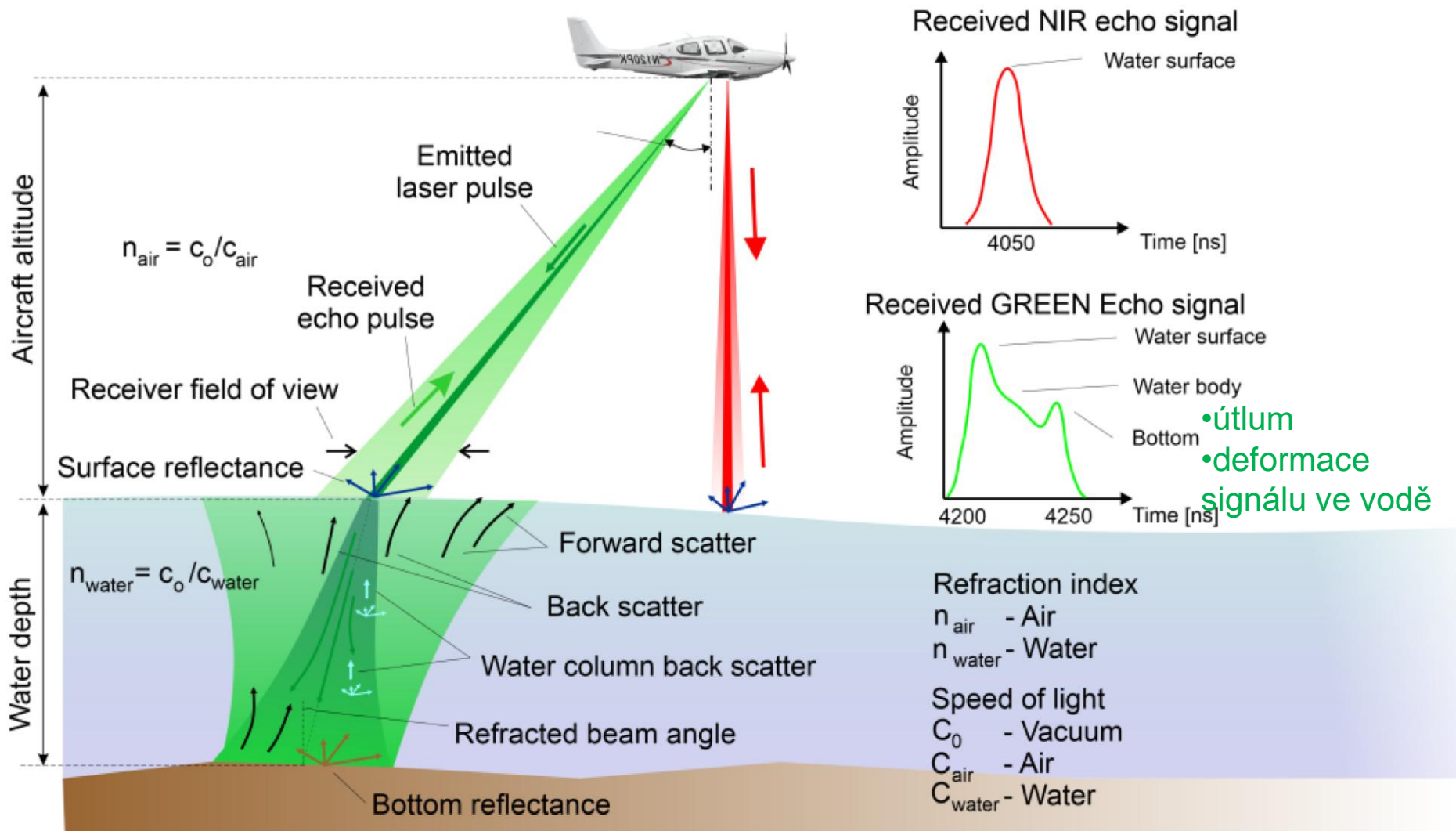


Použitelný do hloubek 2 Secchi, obvykle desítky metrů

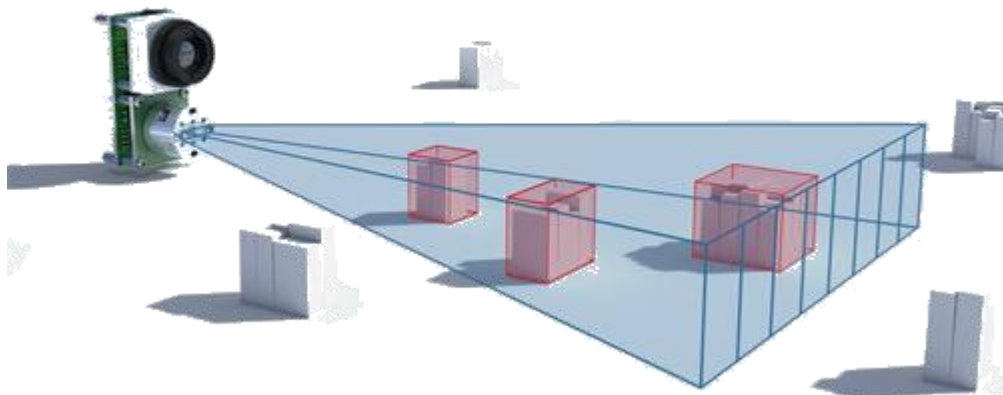
Secchiho kotouč (Angelo Secchi):  $\phi$  30 cm slaná, 20 cm sladká voda



# Dron, letadlo, vrtulník, družice



# LIDAR nebo 3D skener? Někdy prolínání úloh



3D skener/LIDAR

v

mobilu

autonomním

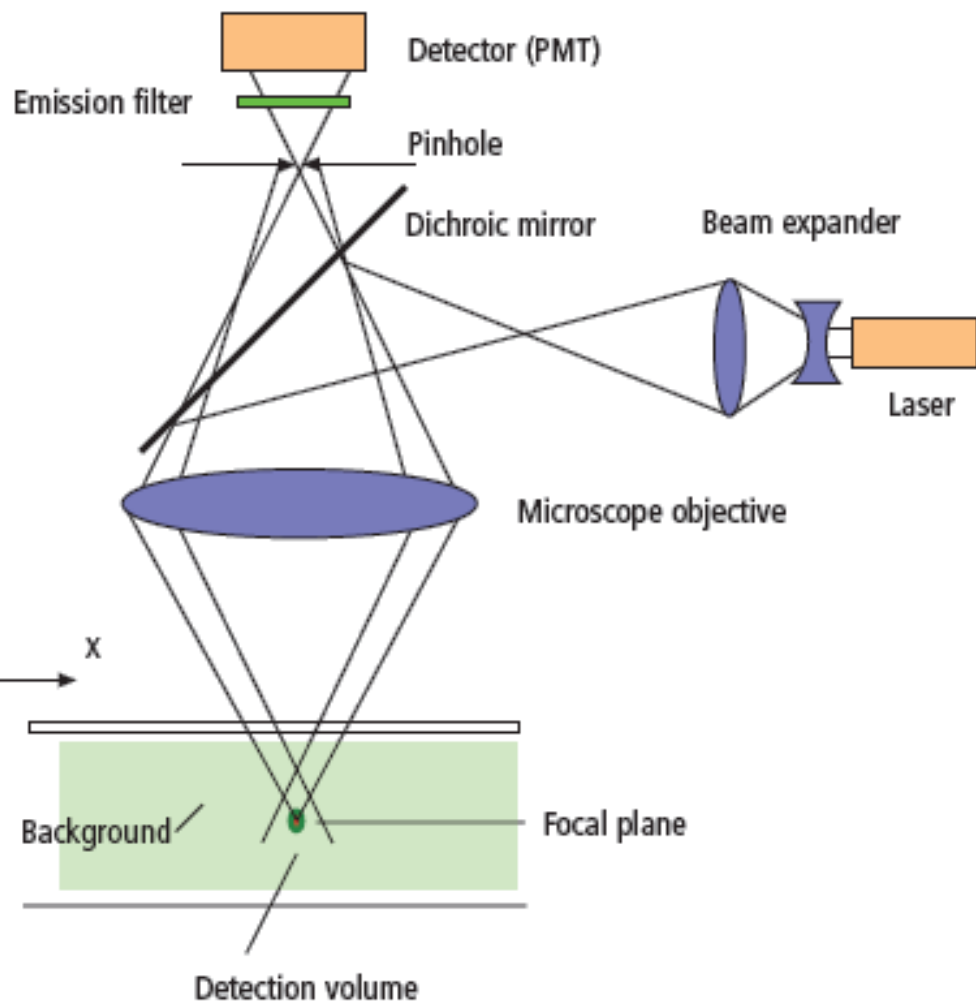
vozidle

dronu

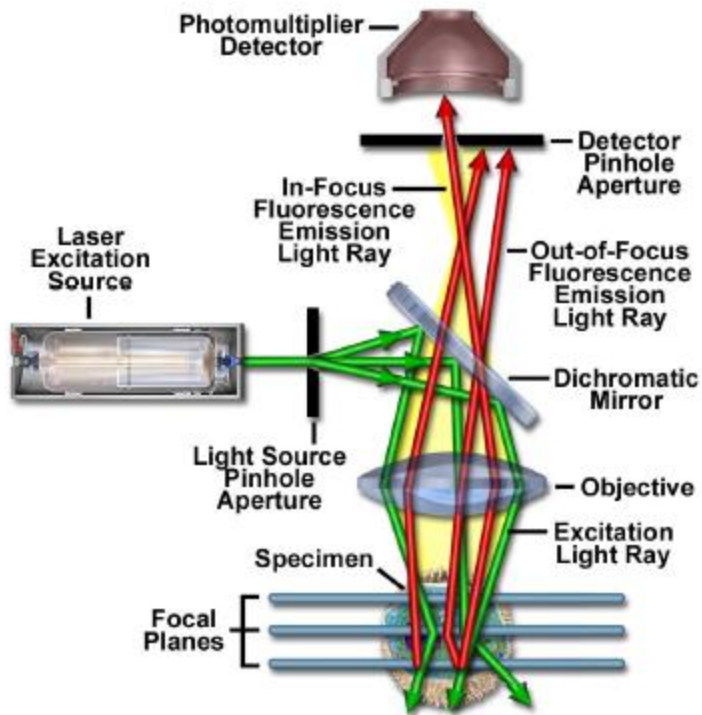
Buckinghamský palác

# Konfokální mikroskopie -

prostorové skenování laserem  
buzené fluorescence, přeastřování  
do různých hloubek i horizontálních  
poloh



*Beam path in a confocal LSM. A microscope objective is used to focus a laser beam onto the specimen, where it excites fluorescence, for example. The fluorescent radiation is collected by the objective and efficiently directed onto the detector via a dichroic beamsplitter. The interesting wavelength range of the fluorescence spectrum is selected by an emission filter, which also acts as a barrier blocking the excitation laser line. The pinhole is arranged in front of the detector, on a plane conjugate to the focal plane of the objective. Light coming from planes above or below the focal plane is out of focus when it hits the pinhole, so most of it cannot pass the pinhole and therefore does not contribute to forming the image.*



Schematic diagram of the optical pathway and principal components in a laser scanning confocal microscope.